

ÉRICK BASTOS EMERICH

MANOBRA DO NAVIO: provas de mar

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica/Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador (a): Henrique Vaicberg

RIO DE JANEIRO

2014

ÉRICK BASTOS EMERICH

MANOBRA DO NAVIO: provas de mar

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: professor Henrique Vaicberg

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

DEDICATÓRIA

Dedico esta obra ao meu Deus, primeiramente, por tudo o que Ele me fez passar e aprender nesse tempo aqui dentro, pelo meu crescimento como pessoa e como servo. Também aos meus pais, com sua sabedoria infinita para me ajudar a enfrentar os problemas. Às pessoas que me ajudaram tanto, mas que hoje em dia não convém falar o nome, pessoas que não desistem de mim nunca. Dedico essa obra à Marinha Mercante Brasileira, que carece de obras acadêmicas nacionais acessíveis aos profissionais da área.

RESUMO

O trabalho a seguir descreve de forma qualitativa e quantitativa todos os procedimentos pertinentes às provas de mar, que ocorre após o lançamento do navio e ajustes. O trabalho se divide em duas partes: a prova de velocidade, que busca uma avaliação mais quantitativa do desempenho do navio buscando atender a condição contratual requerida; e a prova de manobra, cujo aspecto é mais qualitativo, que busca descobrir capacidade de giro, capacidade de giro inicial, capacidade de guinada, estabilidade direcional e capacidade de parar.

Palavras-chave: Preparação. Condução. Correção. Análise.

ABSTRACT

The following work describes qualitatively and quantitatively all the procedures pertinent to the Sea Trials, which occurs after the ship launching and adjustments. The work is divided into two parts: the speed/power trial, which searches a quantitative evaluation of the ship performance seeking to find the contractual condition; and the maneuver trial, whose aspect is qualitative, seeking to find turning ability, initial turning ability, yaw checking ability and stopping ability.

Keywords: Preparation. Conduct. Correction. Analysis.

Lista de ilustrações

Figura 1: Limites de altura de onda durante a prova de velocidade	15
Figura 2: trajeto da prova de velocidade	19
Figura 3: vetores das componentes do vento	24
Figura 4: velocidade no fundo versus potência desprendida sem o efeito da corrente	26
Figura 5: velocidade da corrente de maré ao longo do dia	27
Figura 6: Perda de velocidade devido aos efeitos de água rasa	28
Figura 7: curvas P_s / V_s^3	30
Figura 8: curvas P_s / N^3	30
Figura 9: curvas V_s / N	31
Figura 10: curvas T / V_s	32
Figura 11: curvas T / N^2	32
Figura 12: curvas de performance estimadas na prova e para condições atmosféricas	33
Figura 13: curvas de performance estimadas	34
Figura 14: curva de corrente final	34
Figura 15: fluxograma de análise da prova de mar segundo a ISO 15016	35
Figura 16: curvas características do propulsor e ponto de operação	36
Figura 17: razão de deslizamento	37
Figura 18: gráfico do coeficiente de vento em vento de proa	40
Figura 19: coeficiente direcional de resistência do vento	40
Figura 20: gráfico do fator de dedução de resistência devido ao governo	43
Figura 21: gráfico K_Q versus J	44
Figura 22: gráfico K_Q versus n	45
Figura 23: velocidade da corrente versus tempo	47
Figura 24: fluxograma da análise dos dados da prova de velocidade segundo a ITTC 2012	49
Figura 25: esquema da curva de giro	54

Figura 26: dados obtidos na manobra de zig-zag	55
Figura 27: dados obtidos na manobra espiral	56
Figura 28: comparação na manobra entre um navio estável e um navio instável	57
Figura 29: curva descrita pelo navio em uma parada brusca	58

Lista de tabelas

Tabela 1: parâmetros primários obtidos na prova de velocidade	18
Tabela 2: parâmetros secundários obtidos na prova de velocidade	18
Tabela 3: distância de aproximação versus tempo correspondente segundo a ITTC	20
Tabela 4: distância de aproximação versus tempo correspondente segundo a BSRA	21

Lista de Abreviaturas e Siglas

BSRA - British Ship Research Association (Associação Britânica de Pesquisa de Navios)

DGPS - Differential Global Positioning System (Sistema Global de de Posicionamento Diferencial)

EEDI - Energy Efficiency Design Index (Índice de Eficiência Energética de Projeto)

IMO - International Maritime Organization (Organização Marítima Internacional)

ISO - International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)

ITTC - International Towing Tank Conference (Conferência Internacional de Tanque de Provas)

MCR - Maximum Continuous Revolution (máximo número de revoluções do hélice)

NCR - Nominal continuous rating (potência nominal contínua do propulsor)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
2.1 Finalidade	13
2.2 Prova de mar	13
3 PROVA DE VELOCIDADE	14
3.1 Condições limite da prova	14
3.1.1 Localização da prova	14
3.1.2 Vento	14
3.1.3 Estado do mar	14
3.1.4 Profundidade	15
3.1.5 Corrente	16
3.1.6 Temperatura e salinidade da água	16
3.2 Condições do navio para a prova	16
3.2.1 Condição de carregamento	16
3.2.2 Trim	16
3.2.3 Rugosidade	17
3.2.4 Geometria do propulsor	17
3.3 Procedimentos da prova	17
3.3.1 Informações do modelo teste	18
3.3.2 Preparação para a prova	19
3.3.3 Trajetória da prova de velocidade	19
3.3.3.1 Aproximação	19
3.3.3.2 Trecho de medição	21
3.3.3.3 Afastamento	21
3.3.3.4 Curva de Williamson modificada	22

	16
3.3.4 Tempo da prova	22
3.3.5 Informações obtidas em cada corrida	22
3.3.6 Número de corridas	22
3.4 Análise dos resultados	23
3.4.1 Análise e correção no padrão BSRA	23
3.4.1.1 correção do vento	23
3.4.1.2 Correção da corrente	26
3.4.1.3 Correção de águas rasas	27
3.4.1.4 Correção para condições atmosféricas	29
3.4.1.5 Curvas de performance finais	33
3.4.2 Análise e correção no padrão ISO 15016	34
3.4.2.1 Avaliação dos dados	35
3.4.2.2 Correção do vento	39
3.4.2.3 Correção de ondas	41
3.4.2.4 Correção devido a temperatura da água e salinidade	41
3.4.2.5 Correção devido a efeitos de governo (steering) e deriva	42
3.4.2.6 Correção devido ao deslocamento e ao trim	43
3.4.2.7 Correção devido ao aumento da resistência	44
3.4.2.8 Correção devido aos efeitos de corrente	46
3.4.2.9 Correção devido aos efeitos da resistência do ar	47
3.4.2.10 Correção devido a águas rasas	48
3.4.3 Análise e correção no padrão ITTC 2012	49
3.4.3.1 Avaliação dos dados	49
3.4.3.2 Correção devido aos efeitos de vento	50
3.4.3.3 Correção devido aos efeitos de ondas	50
3.4.3.4 Correção devido aos efeitos da temperatura da água e da salinidade	51
3.4.3.5 Correção devido aos efeitos de governo (steering) e deriva	51

	17
3.4.3.6 Correção devido aos efeitos do deslocamento e do trim	51
3.4.3.7 Correção devido aos efeitos de corrente	51
3.4.3.8 Correção devido aos efeitos de águas rasas	51
3.4.3.9 Cálculo da potência corrigida	51
4 PROVA DE MANOBRA	53
4.1 Tipos de manobras	53
4.1.1 Curva de giro (turning circle)	53
4.1.2 Manobra de zig-zag (Z-manoeuvre test)	54
4.1.3 Manobra espiral (spiral manoeuvre)	56
4.1.4 Teste Pull-out (pull-out test)	57
4.1.5 Teste de parada brusca (crash stopping test)	57
4.1.6 Teste de parada inercial (stopping inertia test)	58
4.1.7 Teste de homem ao mar (man-overboard test)	58
4.1.8 Manobra de curso paralelo (parallel course manoeuvre test)	59
4.1.9 Teste de curva inicial (initial turning test)	59
4.1.10 Teste de curva de aceleração (accelerating turning test)	59
4.1.11 Teste do thruster (thruster test)	60
4.1.11.1 Manobra de giro (turning manoeuvre)	60
4.1.12 Crabbing test	60
4.2 Condições limites da prova	60
4.2.1 Localização da prova	60
4.2.2 Vento	61
4.3 Condições do navio para a prova	61
4.3.1 Condição de carregamento	61
4.4 Procedimentos para análise dos resultados	61
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

De fato, o que certamente faz a marinha mercante funcionar é a possibilidade de altos lucros; sem isso, certamente não se construiriam embarcações tão majestosas como as dos dias de hoje.

No Brasil isso não poderia ser diferente. O nosso Governo tem se dado conta dos custos elevados gerados pelo modal rodoviário e tem tomado medidas como fazer concessões ferroviárias; e em 2012 criou o Plano Hidroviário Estratégico para aprimorar ainda mais o transporte de cargas e passageiros por hidrovias com um plano estrutural, eficiente e sólido, com limite de implantação até 2031.

Ou seja, haverá um evidente estímulo no setor aquaviário. Diante disso, será necessário a capacitação de várias áreas, desde o projeto do navio até a sua manutenção enquanto operando.

Para o nascimento de cada uma dessas maravilhas transportadoras de riquezas, haverá o primeiro corte do aço, a montagem dos blocos, o batimento de quilha, o lançamento do navio, a etapa de acabamentos, as provas de mar e a entrega.

No decorrer desse relatório, trataremos apenas da etapa das provas de mar, viagens de curta duração que testam o desempenho da embarcação, verificando as condições de navegação, velocidade, manobras, motor, equipamentos e requerimentos contratuais. O não cumprimento das condições das provas pode acabar em multa ou cancelamento da encomenda.

Serão apresentados os estudos e métodos utilizados na realização das provas e sua análise, a fim de se familiarizar com os procedimentos das provas.

2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

2.1 Finalidade

- a) Estudar a preparação e condução das provas de mar;
- b) Estudar a avaliação dos resultados obtidos nas provas de mar;
- c) Comparar métodos existentes de condução e avaliação.

2.2 Prova de mar

Prova de mar (sea trial) significa a fase de teste de uma embarcação, incluindo barcos, navios e submarinos. Ocorre em mar aberto e pode durar de algumas horas a muitos dias.

Todos os navios de um certo porte bruto irão realizar provas de mar como parte da entrega do estaleiro para o dono da embarcação.

É conduzida para mensurar o desempenho da embarcação e navegabilidade. Testes de velocidade, manobrabilidade, equipamentos e aspectos de segurança são conduzidos.

Tradicionalmente feita em águas profundas, pouca corrente e ventos, em condição de carga especificada, de preferência a de operação da embarcação. Raramente é possível realizar este teste em particular sob tais condições, e quando o teste é feito em outras condições, o resultado é corrigido de volta para a condição contratual.

As provas de mar podem ser divididas em duas partes: as provas de velocidade (testes para avaliação da velocidade e potência contratual requerida) e provas de manobra (testes para avaliação da manobrabilidade da embarcação).

3 PROVA DE VELOCIDADE

O propósito principal da prova de velocidade é determinar o desempenho do navio em termos de velocidade, potência e revoluções do propulsor sob condições prescritas para o navio, verificar se corresponde às condições contratuais estipuladas de velocidade e para o cálculo do Índice de Eficiência Energética do Projeto (EEDI) requerido pela IMO.

3.1 Condições limite da prova

Durante a prova de velocidade, existem muitas condições que desviam da condição contratual. O objetivo durante a prova de velocidade é manter o número de fatores que interfiram o mais limitado possível. Apesar de haver métodos de correção para certos desvios da condição contratual, esses métodos são válidos apenas para certos limites.

A prova de velocidade deve ser realizada em certas condições: grande profundidade da região, sem vento, ou ondas, ou corrente. Normalmente, essas condições estipuladas não são experimentadas durante a prova. Na prática, certas correções das condições ambientais são feitas, considerando as discrepâncias das condições desejadas.

3.1.1 Localização da prova

Vento forte e mar grosso combinado com um aproamento não alinhado com a direção das ondas pode forçar o uso excessivo de deflexões do leme para manter o rumo, e causar altas flutuações no torque do eixo, torque da velocidade e na própria velocidade do navio.

A prova de velocidade deve ser conduzida em uma localização onde as condições ambientais são constantes e ter apenas um impacto mínimo na embarcação de forma a evitar efeitos ambientais inesperados que podem afetar os resultados da prova de velocidade.

Isso significa que o local de prova deveria ser localizado em uma área abrigada (pouco vento, ondas e corrente). Além disso, a área deveria ser livre de tráfego comercial e de pequenas embarcações.

3.1.2 Vento

Segundo a ITTC, a intensidade do vento não deverá ultrapassar:

6 na escala Beaufort para navios com $L_{pp} \geq 100$ metros

5 na escala Beaufort para navios com $L_{pp} < 100$ metros

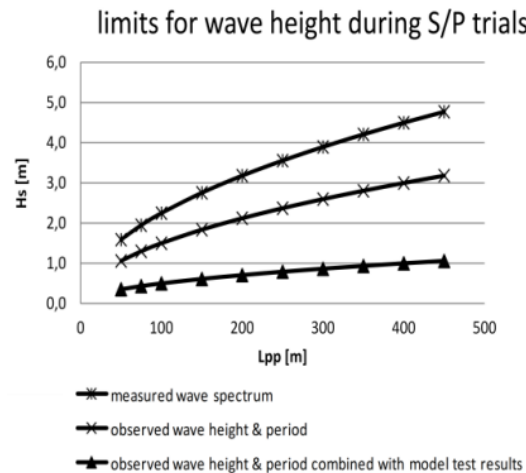
3.1.3 Estado do mar

Provas de mar são conduzidas em mar calmo ou moderado com alturas restritas das ondas.

Segundo a ITTC, a altura total da onda H , derivada das alturas significativas das ondas do mar $H_{W1/3}$ e swell $H_{S1/3}$, será determinada por:

$$H = \sqrt{H_{W1/3}^2 + H_{S1/3}^2}$$

Figura 1 Limites de altura de onda durante a prova de velocidade



Fonte: ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Speed and Power Trials - Part I Preparation and Conduct

O gráfico acima é obtido pelas fórmulas:

- 1) Espectro de onda: $H \leq 2.25\sqrt{L_{pp}/100}$
- 2) Observações visuais: $H \leq 1.50\sqrt{L_{pp}/100}$
- 3) Observações visuais com modelo testado: $H \leq 0.50\sqrt{L_{pp}/100}$

Para determinar altura, período e direção das ondas, recomenda-se usar boias medidoras de ondas (wave buoys), radares de ondas, scanners de ondas ou lasers de ondas. A precisão de cada equipamento deve ser validada e documentada.

Também podem ser requisitados marítimos experimentados para verificar visualmente a altura das ondas na região de prova, incluindo representante do Armador e o Inspetor. Além de dados meteorológicos fornecidos por uma estação de terra experiente e independente.

3.1.4 Profundidade

De acordo com a recomendação da ITTC para preparação e condução de provas de velocidade de 2012, a profundidade mínima será determinada nos seguintes casos:

- 1) Para que não seja necessária nenhuma correção nos resultados da prova em relação à profundidade, valerá o maior resultado das duas equações:

$$h=3\sqrt{B \cdot T} \text{ e } h=2,75 V_s^2/g$$

- 2) O valor mínimo aceitável, com correções nos resultados da prova em relação à profundidade, será o maior das duas equações seguintes:

$$h=2\sqrt{B \cdot T} \text{ e } h=2 V_s^2/g$$

Mesmo assim, deve-se tomar o cuidado de evitar variações bruscas no contorno do fundo. A profundidade durante a prova de velocidade deve ser medida por instrumentos do navio e documentada no “Registro da Prova de Mar” (Trial Log).

3.1.5 Corrente

Áreas conhecidas por grande variação na corrente ao longo do tempo e espaço devem ser evitadas.

A velocidade e direção da corrente devem ser determinadas na área de teste por análise prognóstica. Quando a direção e velocidade da corrente são desconhecidas, a deriva global do navio (incluindo efeito de vento) em alguns casos pode ser determinada por um teste de giro de 360⁰ conduzido a baixa velocidade a vante para mensurar qualquer efeito ambiental.

Pode-se obter também medindo-se a corrente com uma boia medidora de corrente ou cartas náuticas e cartas de maré da região da prova. O melhor é comparar os dados obtidos pela boia com os dados existentes na cartas.

3.1.6 Temperatura e salinidade da água

De acordo com a ITTC, tais fatores alteram a densidade da água, e, portanto, a resistência do navio. Usualmente os cálculos de previsão das provas de velocidade são baseados na temperatura da água do mar de 15°C e na densidade de 1025 Kg/m³.

3.2 Condições do navio para a prova

3.2.1 Condição de carregamento

Nesse caso, devemos pensar para carregamento os calados, o trim e o deslocamento do navio na prova. Navios mercantes a baixa velocidade com trim de popa tem um aumento virtual na sua popa, aumentando a resistência de separação. A medida que a velocidade aumenta, e a proa tende a emergir, fazendo com que o formato da região de vante fique mais fino, diminuindo a resistência de geração de ondas. No caso de calado paralelo, a superfície molhada por tonelada de deslocamento tende a ser maior, então a resistência friccional por tonelada é maior.

O navio deverá ser levado a uma condição de carregamento que seja a mais próxima possível da condição contratual e/ou da condição em que o modelo em escala reduzida foi testado. A condição de carregamento será confirmada com o navio parado. Os calados a vante e a ré, o trim e o deslocamento deverão ser obtidos no começo da prova.

O deslocamento deverá ser obtido dos dados de Bonjean ou usando-se equações quadráticas com dados hidrostáticos, considerando os calados usados (a vante, a meia nau e a ré). Ele deverá ser no máximo 2% distante do deslocamento requerido, ou comparativamente com o modelo de teste.

3.2.2 Trim

Recomenda-se que se faça a distribuição de pesos de modo que não haja banda. O trim deve ser mantido em limites bem estreitos. Para a condição de calados iguais, o trim deverá ser menos que 1,0% do calado a meia nau. Para provas com o navio trimado, a imersão do bulbo de proa deve ser por volta de mais ou menos 0,1m da condição do navio para qual os resultados do modelo teste foram avaliados.

Se o casco apresentar inclinação transversal, a superfície imersa será assimétrica, aumentando a geração de ondas e, conseqüentemente, a resistência de ondas.

3.2.3 Rugosidade

Ainda hoje de difícil quantificação em relação à resistência total do navio. Contudo, sabe-se que ela é diminuída utilizando-se tintas especiais no casco, e que uma tinta é melhor que a outra, mas não exatamente o quanto é reduzida a resistência exatamente.

No Principles of Naval Architecture volume 2, é dito que qualquer rugosidade na superfície aumentará a resistência friccional apreciavelmente sobre uma superfície lisa, e também com corrosão e incrustação, grandes aumentos irão ocorrer. Um aumento de 0,0025 centímetros na rugosidade média pode aumentar a resistência em 2,5%.

De acordo com a Akzo Nobel, um casco com uma superfície muito áspera pode aumentar o consumo de combustível em 40%, enquanto que uma superfície completamente incrustada resulta em um aumento de 10%.

Apesar de tanta informação, é extremamente difícil quantificar os efeitos da rugosidade e, por isso, geralmente, esses não são corrigidos.

A ITTC recomenda que o tempo decorrido entre a docagem e a prova sejam de no máximo 2 semanas, devido aos efeitos de corrosão e incrustação no casco.

É necessário descrever o comprimento, a profundidade, a posição e o método com o qual a bolina foi conectada ao casco. O percentual das juntas soldadas na parte do casco abaixo da linha d'água e a altura média dos cordões de solda devem ser estimados. O tamanho, número, posição e método de conexão dos anodos no casco devem ser esboçados. As aberturas de admissão e descarga de água devem ter seus tamanhos, posições e estruturas observadas.

Contudo, a ISO 15016 de 2012 diz que se a prova é realizada em um razoável período de tempo após a pintura final do casco do navio e polimento do propulsor, mudanças na rugosidade da superfície deveriam ser mínimas e o efeito no desempenho do navio desprezível. Mas para casos particulares em que a prova acontecer em um intervalo de tempo apreciável após a docagem final, e o efeito da rugosidade na superfície não puder mais ser ignorado, existem métodos disponíveis para correção desses efeitos. Os métodos, contudo, não são científicos, e o desempenho resultante não poderia ser utilizado para nenhum propósito além do propósito geral.

3.2.4 Geometria do propulsor

O navio deve ter a propulsor impecável para a prova, pois aumento na resistência do navio devido a rugosidade e incrustação não serão corrigidos, como já foi discutido anteriormente.

A data da última docagem e limpeza do casco e do propulsor devem ser documentados no S/P Trials Report.

3.3 Procedimentos da prova

Anteriormente, contemplamos as condições necessárias à realização da prova para que os dados obtidos na prova de velocidade não necessitem de correção ou que tenham o mínimo de correção possível, buscando que os resultados estejam baseados nas condições ideais estipuladas. Nesse momento, nos ateremos a descrever os procedimentos necessários durante a prova de velocidade. Alguns parâmetros devem ser considerados, sendo separados em primários e secundários. As tabelas seguintes exibem as variáveis a serem consideradas e como elas serão monitoradas durante cada corrida:

Tabela 1: parâmetros primários obtidos na prova de velocidade

Parâmetros primários	Equipamentos aceitáveis de medição	Unidade
Rumo no fundo	DGPS	[latitude, longitude] ou [m]
Velocidade no fundo	DGPS	[nós]
Torque ou potência	Medidor de torção com sensor de torque calibrado permanentemente ou medidores de tensão. Potência calculada a partir do torque e das RPM	[kN.m] ou [kW]
RPM	Sensor óptico, contador de revoluções do navio	[RPM]
Passo do propulsor	Replicador do passadiço	
Tempo	Tempo do GPS, cronômetro	[s]
Profundidade do fundo	Ecobatímetro + cartas náuticas	[m]
Rumo na superfície	Agulha giroscópica, agulha satélite	[graus]
Vento relativo, velocidade e direção	Anemômetro do navio, anemômetro dedicado da prova	[m/s], [nós], [graus]
Altura das ondas, período e direção	Equipamento medidor de ondas, como: boia de ondas, radar, ou lidar. Observação por múltiplos marítimos experientes	[m], [s], [graus]
Calados	Observação física e/ou medidores calibrados de calado	[m]

Fonte: ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Speed and Power Trials - Part I Preparation and Conduct

Tabela 2: parâmetros secundários obtidos na prova de velocidade

Parâmetros secundários	Equipamentos aceitáveis de medição	Unidade
Densidade da água	Sensor de salinidade, sensor de temperatura, densidade e salinidade (CDT)	[kg/m ³]
Temperatura da água	Sensor de temperatura, densidade e salinidade (CDT)	[°C]
Temperatura do ar	Termômetro	[°C]
Pressão do ar	Barômetro	[hPa], [mBar]

Fonte: ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Speed and Power Trials - Part I Preparation and Conduct

3.3.1 Informações do modelo teste

As informações do modelo teste são importantes porque, normalmente, as provas de velocidade são realizadas com o navio em lastro, e para que haja a correção para a condição contratual, a de carregamento, compara-se com os gráficos gerados pela diferença entre a condição em lastro e a carregada da prova realizada no modelo teste.

As características do modelo teste devem ser bem semelhantes à do navio. Em relação às características do propulsor, é requerido que o modelo teste inclua os resultados da variação da carga do hélice.

3.3.2 Preparação para a prova

Antes da prova iniciar, deve ser registrado: data e hora de início da prova, região da prova, previsão do tempo, densidade e temperatura da água, pressão e temperatura do ar, velocidade e direção do vento, profundidade média estimada na região de prova, calados AV, AR e a MN e deslocamento.

No caso especial de navios de passo controlável, deve-se registrar também o passo do propulsor. A BSRA recomenda que durante a prova se mantenham constantes as rotações do eixo e que se varie o passo do propulsor, desde que se faça uma correção do passo, através de plotagem gráfica, em virtude das condições atmosféricas.

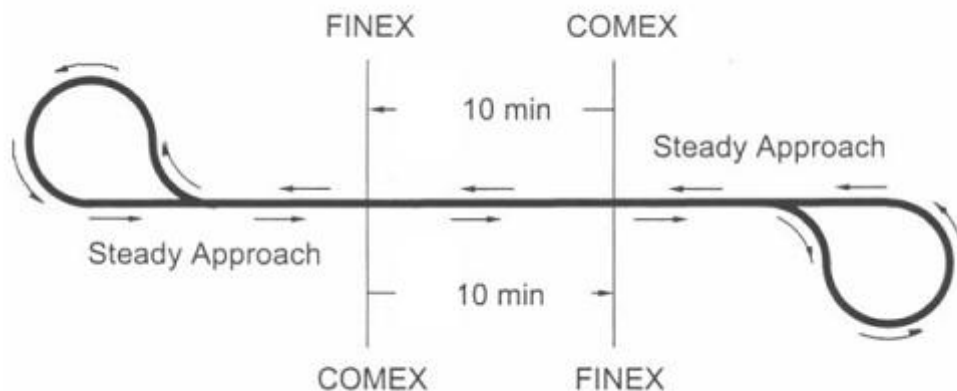
3.3.3 Trajetória da prova de velocidade

A prova deve ser conduzida na mesma área em relação ao fundo. Para cada corrida, a prova terá um começo (COMEX) e um final (FINEX). Entre cada corrida será executada a manobra Williamson Modificada para retornar o navio para a mesma linha de base e sobre a mesma área em relação ao fundo onde a primeira corrida foi conduzida, para se evitar diferentes estados de mar e vento.

Cada corrida tem quatro trechos: aproximação, trecho de medição, afastamento e curva de Williamson modificada.

Os reguladores de pressão da máquina não devem ser movidos nesse período. Os ângulos usados no leme nessa manobra devem ser tais que as perdas de velocidade e tempo sejam minimizados.

Figura 2: trajeto da prova de velocidade



Fonte: ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Speed and Power Trials - Part I Preparation and Conduct

3.3.3.1 Aproximação

Nesse trecho, o navio acelera até uma velocidade correspondente à potência fornecida pelo motor e deve ser mantido em um determinado rumo, utilizando o menor ângulo de leme possível para evitar aumento de resistência e conseqüente perda de velocidade.

A aproximação na prova de velocidade deve ser tão longa quanto necessário para assegurar uma condição no navio estável no COMEX de cada corrida. Durante a aproximação,

o navio deve usar o mínimo de leme possível. Segundo informações, é melhor permitir que o navio desvie um grau do rumo do que manter um ângulo de leme igual a cinco graus.

Isso se deve pois quando o leme é utilizado, o leme pode aumentar a resistência da embarcação. Em virtude do fluxo de água incidindo no seu ângulo de ataque, além da maior geração de vórtices, há a parcela do arrasto que aumenta com o quadrado de pequenos ângulos de ataque.

Sobre o trecho de aproximação, não existe uma distância fixada, ou estabelecida, porque depende das características do motor, da perda de velocidade durante a curva de giro e do deslocamento do navio. Até hoje não foi estabelecido um critério definitivo para determinar a distância mínima de aproximação para as corridas. Para este caso, utilizam-se tabelas preenchidas de acordo com as provas já realizadas, que sugerem algumas distâncias a serem utilizadas como parâmetro.

Segundo a ITTC, a tabela a seguir representa uma indicação de distâncias de aproximação e tempos correspondentes a três velocidades:

Tabela 3: distância de aproximação versus tempo correspondente segundo a ITTC

Size of ship [DWT]	Approach distance [nm]	Approach time [min]		
		15 knots	20 knots	25 knots
50,000	4 – 5	20	15	12
100,000	5 – 7	26	20	16
250,000	8 – 10	40	30	24
500,000	12 – 15	60	45	36

Fonte: ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Speed and Power Trials - Part I Preparation and Conduct

Esta tabela possibilita uma utilização mais generalizada, visto que não limita os valores de aproximação de alguns tipos de navios.

A BSRA também apresenta outra tabela, mais subdividida, podendo fornecer fatores mais específicos para cada caso, o que transmite maior confiabilidade em sua utilização:

Tabela 4: distância de aproximação versus tempo correspondente segundo a BSRA

Navio	Condição	Distância aproximada requerida					
		Deslocamento (t)	Na NCR		A 45% de NCR		
			Vs (nós)	Distância (milhas)	Vs (nós)	Distância (milhas)	
Tanques, bihélice	Carregado	1016050 tdw	1124198	15.0	10.0	11.3	11.2
500000 tdw		628034	15.5	8.4	12.0	8.3	
406420 tdw		467017	15.5	6.6	11.0	6.7	
Tanques, mono hélice	Carregado	500000 tdw	625608	16.5	8.6	13.0	8.9
406420 tdw		466499	16.5	7.7	12.5	7.8	
313000 tdw		358860	15.5	7.7	12.4	8.5	
264500 tdw		307930	16.0	6.6	12.5	7.0	
196146 tdw		217442	16.0	6.1	12.3	6.3	
101605 tdw		140215	16.5	4.6	12.9	6.2	
66043 tdw		85384	17.0	3.7	13.9	5.2	
16257 tdw		22861	15.5	2.4	12.4	3.6	
passenger liner 173.3 m		Carregado	18228	22.0	1.5	18.7	2.9
liner 137.15 m	Carregado em lastro	12802	17.0	1.8	13.7	2.3	
		6401	17.5	1.4	13.9	1.5	
graneleiro 30482 tdw	Carregado em lastro	41658	16.0	2.7	12.8	3.6	
		25401	16.5	1.9	13.4	2.8	
cross-channel ship 108.20 m	Carregado	4775	22.5	0.8	18.3	1.5	
pesqueiro	Carregado	1422	13.5	0.6	11.0	0.9	

Fonte: BSRA standard method of Speed Trial Analysis

3.3.3.2 Trecho de medição

Nessa etapa, o navio fará o percurso em uma condição estável, para que os dados relevantes sejam registrados.

Manter constantes a velocidade do navio, rotação e potência do motor. O ângulo máximo de leme será de 3 graus, para BB ou BE, segundo a ITTC.

De acordo com o 10º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval, a distância mínima nesta parte do percurso deve ser de uma milha.

3.3.3.3 Afastamento

Na terceira etapa da prova, o navio deve percorrer uma distância ao menos igual à distância de aproximação, porque o afastamento desse afastamento será a distância de aproximação da próxima corrida consecutiva, no sentido oposto.

3.3.3.4 Curva de Williamson modificada

Último trecho de cada corrida, essa curva é executada entre cada corrida para retornar para mesma área onde a corrida anterior foi realizada, a fim de que diferentes condições de vento e ondas sejam evitadas.

Mais uma vez se recomenda que o ângulo de leme seja o mínimo possível.

Segundo o 10º Conselho Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval, o ângulo não pode exceder 10º. E de acordo com a BSRA, o ângulo jamais pode exceder 15º. E para navios tanques, o ângulo de leme deve ser igual a 5º.

3.3.4 Tempo da prova

De acordo com a ITTC, a duração da prova deve ser a mesma para todas as corridas com um mínimo de dez minutos e durar o máximo tempo possível; também que o tempo de prova deve ser registrado por, no mínimo, três observadores usando cronômetros.

Vale ressaltar que o tempo estimado para cada corrida dependerá da velocidade, do tamanho e da potência do navio.

3.3.5 Informações obtidas em cada corrida

- Hora de início da corrida (UTC)
- Posições de início e término em termos de latitude e longitude
- Tempo decorrido pela distância mensurada
- Rumo na superfície
- Rumo no fundo
- Velocidade no fundo
- Taxa de revoluções do propulsor
- Torque e potência do propulsor
- Caturro do propulsor em caso de ventilação
- Velocidade relativa do vento e direção pelo anemômetro
- Período médio, altura significativa e a direção das ondas
- Período médio, altura significativa e a direção dos swells

A ISO 15016 determina que o rumo na superfície tenha um desvio de no máximo três graus da rota prevista e que o ângulo do leme para manter a trajetória seja de no máximo 5 graus. A influência do leme já foi discutida anteriormente.

3.3.6 Número de corridas

A ITTC recomenda que todas as corridas sejam seguidas pela corrida no sentido oposto. Essas duas corridas juntas são chamadas de Corridas Duplas. Para determinar a curva velocidade-potência, são requeridos um mínimo de cinco Corridas Duplas em três diferentes configurações de potência.

Devem haver duas Corridas Duplas na potência estabelecida em contrato, duas Corridas Duplas por volta da potência da EEDI (75% MCR) e uma Corrida Dupla em pelo menos uma potência entre 65 a 100% do MCR.

As corridas devem ser realizadas durante o dia para permitir clara observação visual das condições de mar.

Se os resultados da prova de velocidade do primeiro navio de uma série de “navios irmãos” for aceitável, os próximos navios da série a serem testados na prova poderão ser

reduzidos. Para esses navios, pode-se fazer apenas três corridas: um Corrida Dupla na potência estabelecida em contrato, uma Corrida Dupla por volta da potência da EEDI (75% MCR) e uma Corrida Dupla em pelo menos uma potência entre 65 a 100% do MCR.

Caso no teste do primeiro navio da série se apresente em algum desses testes variações fortes na corrente (igual ou maior que 0,3 nós) ou a altura das ondas esteja próxima das condições limitantes, será requerida mais uma Corrida Dupla na potência em que foram observadas essas condições.

3.4 Análise dos resultados

Como já foi discutido, na maior parte das vezes as condições de prova divergirão das condições ideais sob a qual se farão os resultados. Por isso, será necessário, ao final da prova de velocidade, realizar as correções dos resultados para se chegar aos dados nessa condição.

A análise da prova de velocidade consiste em:

- Avaliação dos dados adquiridos;
- Correção do desempenho do navio pelo aumento da resistência devido a ventos, ondas, temperatura e salinidade da água;
- Eliminação da corrente;
- Correção das velocidades em cada corrida pelo efeito de águas rasas;
- Correção do desempenho do navio pelo deslocamento e trim;
- Apresentação dos resultados da prova.

Nesta parte, apresentaremos os métodos de análise e correção dos resultados obtidos durante a prova de velocidade em três diferentes padrões: o BSRA (1978), o ISO 15016 (2002) e o ITTC (2012).

3.4.1 Análise e correção no padrão BSRA

Nesse padrão, já começa orientando que os registros contínuos de potência de eixo, rotação e empuxo sejam examinados para constatar a sua consistência antes da análise dos outros dados recolhidos na prova.

Então, pede que sejam feitas as comparações:

- Potência do eixo X rotação (I)
- Potência do eixo X (rotação)³ (II)
- Empuxo X rotação (III)
- Empuxo X (rotação)³ (IV)
- Potência do eixo X empuxo (V)

E, deve-se observar o que se obterá desses gráficos resultantes das comparações. As comparações I, III e V trarão gráficos que representarão curvas e os II e IV linhas retas. Desconsiderando os efeitos ambientais, todos os pontos formam uma única linha, mas, como esperado, isso não acontece. Na prática, os gráficos geram duas linhas separadas: uma a favor e uma contra o tempo.

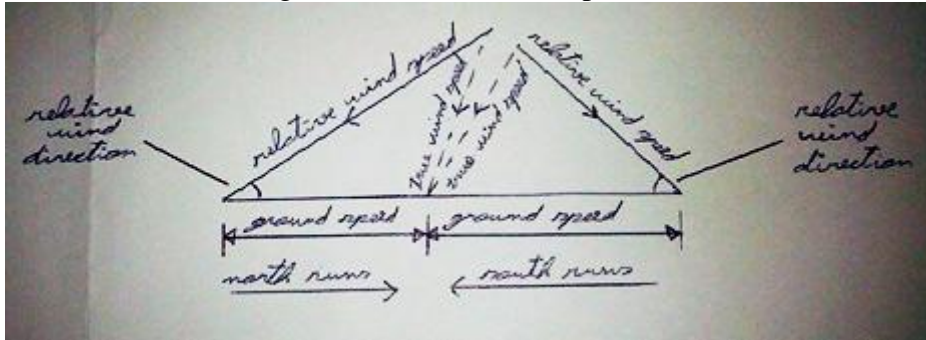
As relações acima acusarão qualquer falha nos dados obtidos em relação a esses três aspectos. Se houver um valor não esperado ou previsto, deve-se averiguar suas causas.

3.4.1.1 correção do vento

Como qualquer efeito de agente externo no navio, o vento poderá fazer variar a resistência da embarcação. Desse modo, durante toda a prova são registradas as condições de vento como já foi abordado.

Inicialmente, prepararemos um diagrama de vetores de vento, no qual a velocidade e a direção do vento são explicitados. Para sua construção, plotaremos a magnitude da velocidade do vento relativa e a sua direção, para cada corrida, sobre uma abscissa de velocidade do navio, melhor compreendido na figura abaixo:

Figura 3: vetores das componentes do vento



Diante desses dados, se consegue a consistência dos dados registrados, e caso não haja, deve-se identificar a causa. Com os dados consistentes, pode-se deduzir a resistência do vento e a potência do vento a partir das fórmulas abaixo:

$$R_{AA} = \frac{A_V}{C} \cdot C_{AA1} \cdot V_{RW}^2$$

$$P_{EW} = R_{AA} \cdot V_G^1 \cdot 0,5145 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{SW} = \frac{P_{EW}}{\eta_D}$$

Sendo:

$$C = 5,838 \cdot (1 + 0,00366 \cdot t^0) \cdot \frac{1012,5}{P_a}$$

$$C_{AA1} = C_{AA} \cdot \phi_1 \cdot \phi_2$$

$$C_{AA} = \frac{R_{AA}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_V \cdot V_{RW}^2}$$

$$\phi_1 = 1 + \frac{2}{(n+1)n} \left(\frac{V_G}{V_{RW}} \right)^2 + \frac{2}{n+1} \left(\frac{V_G}{V_{RW}} \right) \cos \gamma_R$$

$$\phi_2 = \frac{2}{n} \left[\left(1 + \frac{n}{2} \right) - \frac{40}{Z_T} \right] \text{ para } Z_T > 40 \text{ m}$$

$$\phi_2 = \left(\frac{40}{Z_T} \right)^{\frac{2}{n}} \text{ para } Z_T < 40 \text{ m}$$

Onde:

R_{AA} = resistência devido ao vento (N)

P_{EW} = potência efetiva devido ao vento (kW)

P_{SW} = potência de eixo devido ao vento (kW)

A_V = área transversal projetada acima da linha d'água (m²)

C = fator de densidade do ar

t° = temperatura do ar (°C)

p_a = pressão do ar (mbar) $CAA1$ = coeficiente de resistência do vento corrigido

CAA = coeficiente de resistência do vento

ρ = densidade do ar (kg.s²/m⁴)

V_{RW} = velocidade relativa do vento (nós)

ϕ_1 = fator de correção do coeficiente de resistência do vento para a diferença entre a camada limite usada nos testes com modelo e a camada limite efetiva obtida pela soma vetorial da velocidade de vento verdadeira e o próprio movimento do navio

ϕ_2 = fator de correção do coeficiente de resistência do vento para diferença entre a altura do anemômetro e altura da corrente livre nos testes com modelo

V_G^1 = velocidade média do navio (nós)

V_G = velocidade do navio (nós)

n = assume diferentes valores para determinados tipos de navios

Z_T = altura do anemômetro acima da linha d'água (m)

γ_R = direção do vento relativa a proa (graus)

η_D = coeficiente quasi-propulsivo

Depois de determinar a potência do eixo devido à ação do vento P_{SW} , consegue-se encontrar a potência de eixo corrigida para condições sem vento P_0 é feita subtraindo-se a potência calculada da potência de eixo P_S :

$$P_0 = P_S - P_{SW}$$

Onde:

P_0 = potência no eixo corrigida para condições sem vento (kW)

P_s = potência no eixo mensurada (kW)

P_{sw} = potência no eixo devido ao vento (kW)

3.4.1.2 Correção da corrente

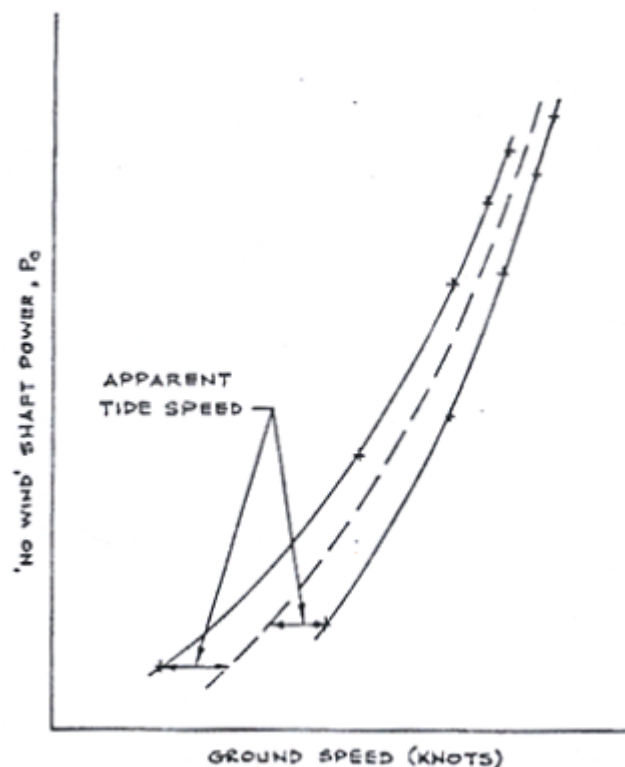
De acordo com o padrão BSRA, a correção da corrente tem que ser feita depois da correção dos ventos. A influência da corrente pode aumentar ou reduzir a velocidade do navio.

Numa relação P_0 versus velocidade do navio, se os efeitos da corrente forem desprezíveis, o gráfico será uma única curva. Mas se os efeitos passarem a ser relevantes, a velocidade do navio vai variar, dependendo do sentido da corrida.

Quando se constata influência de corrente, procura-se realizar a corrida na mesma direção da corrente, fazendo as corridas a favor e contra o sentido da corrente, para que as correções fiquem facilitadas.

Desse modo, fazendo uma corrida a favor e a próxima contra a corrente, ou vice-versa, obteremos o gráfico a seguir:

Figura 4: velocidade no fundo versus potência desprendida sem o efeito da corrente

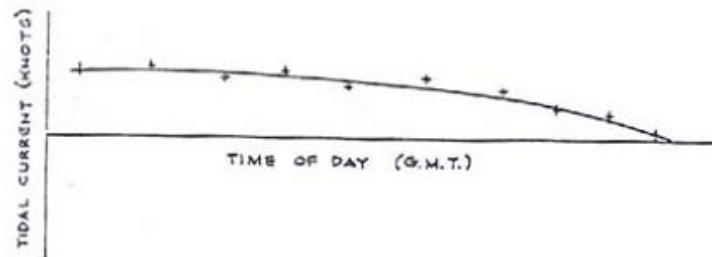


Fonte: Guide for Sea Trials

Então, obteremos duas curvas, uma a favor da corrente e outra contra. A melhor aproximação do gráfico P_0 versus velocidade do navio será a média das duas curvas, a pontilhada no gráfico acima.

Os valores de velocidade de corrente podem, agora, ser lidos para cada corrida e plotados em uma base de tempo do dia:

Figura 5: velocidade da corrente de maré ao longo do dia



Fonte: Guide for Sea Trials

Agora, os valores de corrente para cada corrida são tirados e replotados na primeira relação, para melhorar a curva de potência do eixo devido à ausência de vento.

3.4.1.3 Correção de águas rasas

Seguindo com as correções, recomenda-se que a próxima etapa seja considerar a profundidade da região de prova, se houver necessidade, pois os limites em que não seja necessário corrigir efeito de águas rasas já foram discutidos anteriormente.

Como a profundidade foi registrada continuamente, para cada momento se fará o cálculo da perda de velocidade em virtude de águas rasas.

A fórmula a ser utilizada para se calcular a perda de velocidade encontra-se no livro “LACKENBY, H. The effect of shallow water on ship speed, Shipbuilder, 70, No. 672, 1963”:

$$\frac{\Delta V_s}{V_s} = 0,1242 \left(\frac{A_M}{h^2} - 0,05 \right) + 1 - \left(\tanh \frac{gh}{V_s^2} \right)^{1/2} \text{ para } \frac{A_M}{h^2} \geq 0,05$$

Onde:

A_M = área abaixo da linha d'água medida a meia nau (m^2)

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

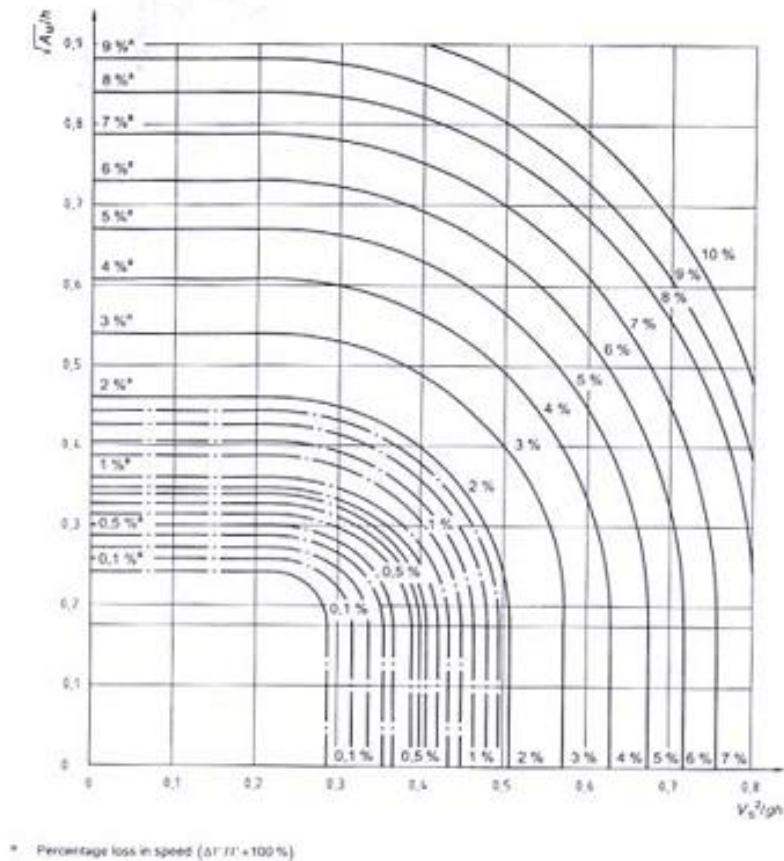
h = profundidade da água (m^2)

V_s = velocidade do navio (m/s)

ΔV_s = perda de velocidade devido à água rasa (m/s)

E dessa fórmula, obteremos o seguinte gráfico:

Figura 6: Perda de velocidade devido aos efeitos de água rasa
Abscissa: (V_S^2 / gh) ; Ordenada: $(A_M / h^2)^{0,5}$



Fonte: Guide for Sea Trials

Se repararmos, se o valor h aumenta, o termo (A_M / h^2) diminui e o termo “ $\tanh (gh/V_S^2)$ ” tende à unidade. Então, quanto maior a profundidade, menor será a perda de velocidade da embarcação, como esperado.

A velocidade corrigida do navio pelo efeito de águas rasas será obtida através da seguinte fórmula:

$$V_{CS} = (1 - \Delta V/V) \cdot V_S$$

Onde:

V_{CS} = velocidade corrigida devido aos efeitos de águas rasas (nós)

$\Delta V/V$ = percentual de perda de velocidade devido aos efeitos de águas rasas

$V_S = V_G \pm V_T$ = velocidade através da água mensurada (nós)

V_G = velocidade do navio (nós)

V_T = velocidade de corrente (nós)

3.4.1.4 Correção para condições atmosféricas

Nessa próxima etapa de correções, o padrão recomenda que os valores de potência no eixo corrigida, rotação, empuxo e passo do propulsor (no caso de passo controlável) sejam ajustados para condições atmosféricas, ou seja, ajustados devido ao próprio movimento do navio em condições ambientais amenas.

A potência no eixo devido à ausência de vento, P_0 , deve ser ajustada para condições atmosféricas através da adição da potência no eixo de ar básica, P_{SBA} :

$$P_{S1\text{still_air}} = P_o + P_{SBA} \text{ (kW)}$$

P_{SBA} é a potência no eixo requerida para superar a resistência do ar devido ao próprio movimento do navio, ou seja, na falta de vento verdadeiro. Calcula-se a potência no eixo de ar básica através de uma maneira similar àquela usada para o cálculo de potência devido aos efeitos de vento.

A potência no eixo de ar básica é determinada como mostrado a seguir:

$$P_{EBA} = \frac{A_V}{C} \cdot E \cdot 0,5145 \cdot V_S^3 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{SBA} = \frac{P_{EBA}}{\eta_D}$$

Onde:

P_{EBA} = potência efetiva de ar básica (kW)

P_{SBA} = potência no eixo de ar básica (kW)

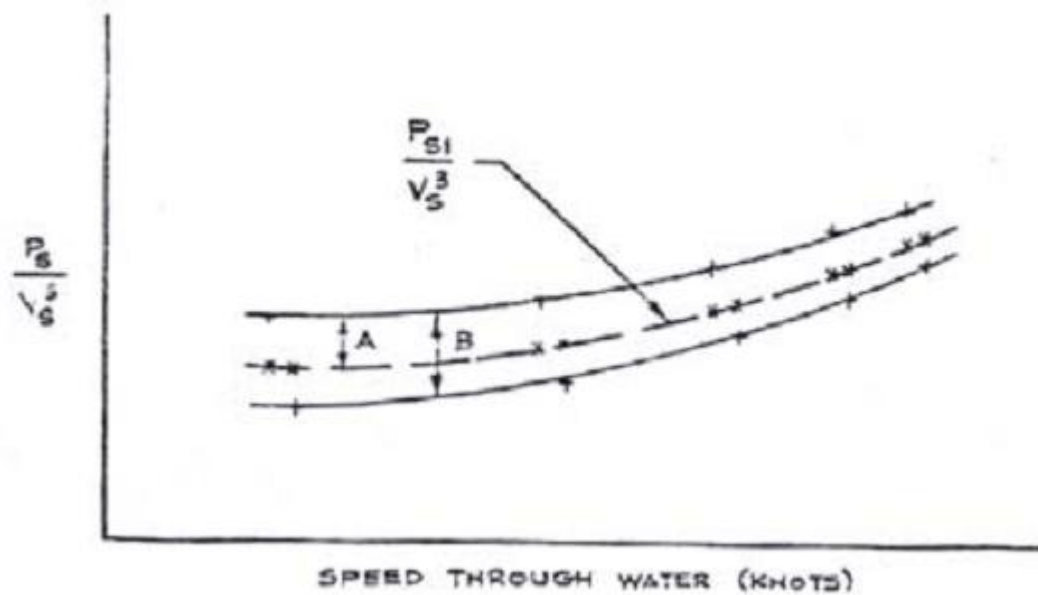
$E = C_{AA}$ (para zero grau da proa) * ϕ_1 (para zero grau)

V_S = velocidade do navio corrigida devido a todos os efeitos relevantes A_V , C e η_D assumem os mesmos valores já utilizados para o cálculo da potência de eixo devido ao vento

Os valores das revoluções por minuto (RPM) serão corrigidos da seguinte forma:

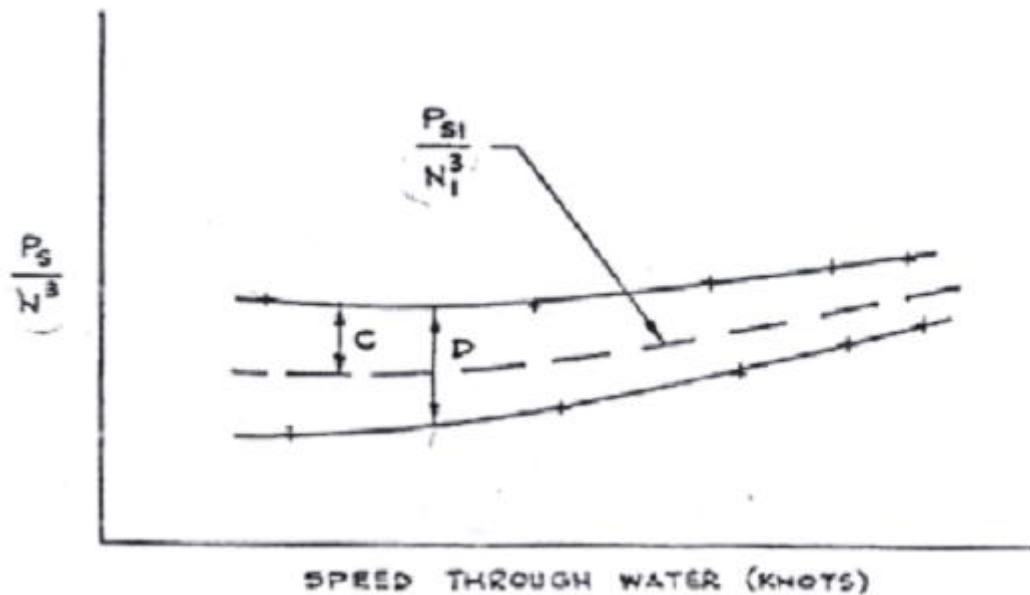
a) Primeiramente, plotar uma relação P_s / V_s^3 na base V_s , sendo P_s a potência do eixo medida durante cada corrida e V_s a velocidade do navio medida em cada corrida.

b) Agora, $P_{S1\text{still_air}} = P_{S1}$, já calculado.

Figura 7: curvas P_S / V_S^3 

Fonte: Guide for Sea Trials

Agora, determinar P_{S1} / N_1^3 , em que N_1 é a rotação do eixo em condições atmosféricas. Assumir por hora que a curva P_{S1} / N_1^3 para condições atmosféricas irá estar na mesma posição relativa que P_S / V_S^3 está em relação a P_S / V_S^3 , ou seja, $A/B = C/D$:

Figura 8: curvas P_S / N^3 

Fonte: Guide for Sea Trials

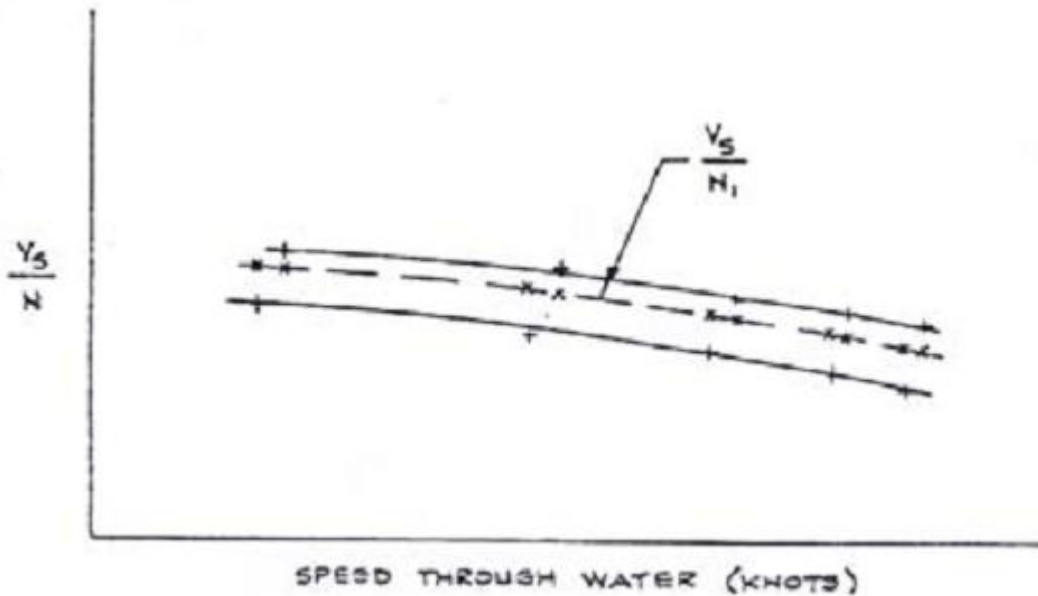
Retira-se, da linha média do gráfico logo P_S / N_1^3 versus V_S , os valores de P_{S1} / N_1^3 para cada corrida e determina-se as rotações corrigidas N_1 através da relação:

$$\sqrt[3]{\frac{1}{P_{S1}/N^3} * P_{S1}}$$

Notando-se que: $\Delta(V_s) \cong \Delta(N)$

E fazer o gráfico a seguir:

Figura 9: curvas V_s / N



Fonte: Guide for Sea Trials

Se o empuxo do propulsor for mensurado, deve-se corrigir os valores registrados para a resistência de vento. Obtém-se o empuxo para condições atmosféricas diminuindo-se a resistência devido ao vento e adicionando-se a resistência básica devido ao ar, como se segue:

$$T_1 = T + R_{BA} - R_W \text{ (kW)}$$

Onde:

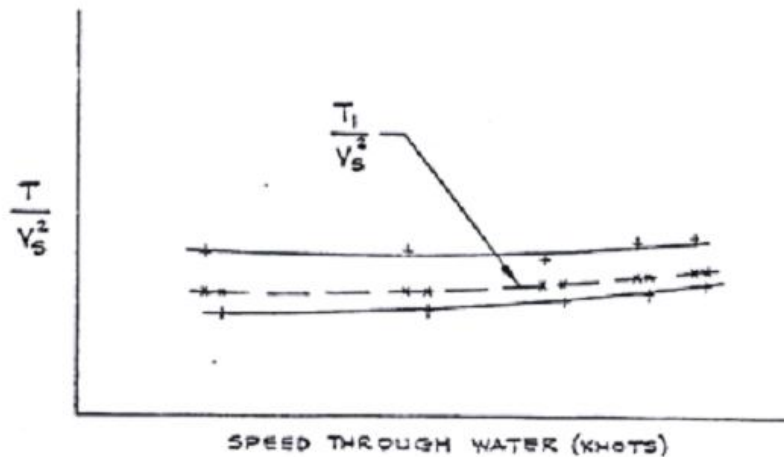
T_1 = empuxo para condições com ar tranqüilo

T = empuxo mensurado (kN)

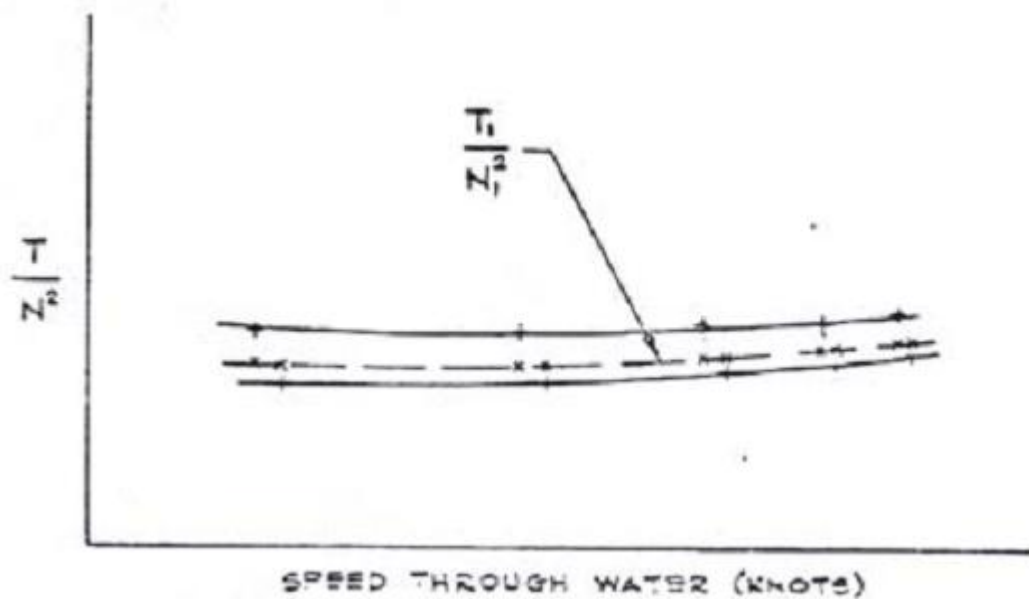
$R_{BA} = P_{EBA} * 1,9439/V_s$ = resistência básica devido ao ar (kN)

R_W = resistência devido ao vento (kN)

Agora calcular os valores T/V_s^2 e T/N^2 e plotá-los contra V_s :

Figura 10: curvas T / V_S 

Fonte: Guide for Sea Trials

Figura 11: curvas T / N^2 

Fonte: Guide for Sea Trials

Para correção do passo do propulsor, recomenda-se não variar, para passo controlável, o passo e as RPM ao mesmo tempo, pois situações mais complexas podem surgir e dificultar os cálculos.

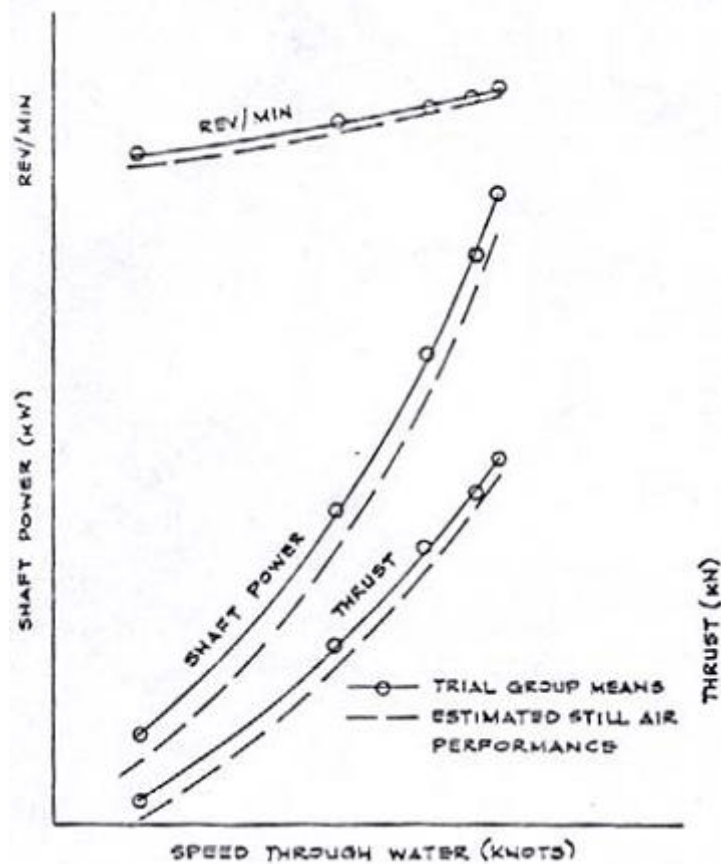
O ajuste nesse caso será feito no passo, de preferência nas condições atmosféricas. Para isto, plota-se os valores de passo contra a potência no eixo e retira-se os valores corrigidos dos passos correspondentes aos valores da potência no eixo em condições atmosféricas, P_{S1} , para cada corrida.

3.4.1.5 Curvas de performance finais

Deve-se plotar os valores médios de potência no eixo, rotação e empuxo mensurados na prova e seus correspondentes valores para condições atmosféricas, para cada corrida, em uma base de velocidade do navio corrigida. Ligando-se os pontos, pode-se identificar as curvas mostradas a seguir.

A curva a seguir descreve as curvas de performance estimadas na prova e para condições atmosféricas:

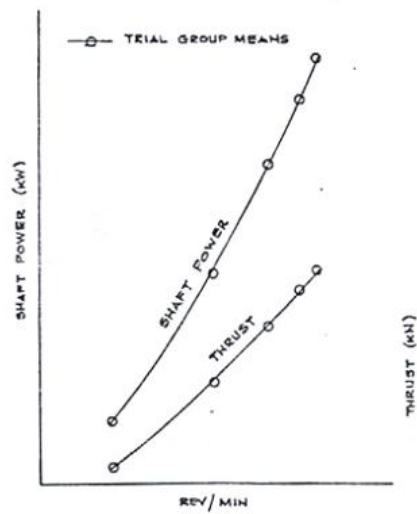
Figura 12: curvas de performance estimadas na prova e para condições atmosféricas



Fonte: Guide for sea trials

A próxima representa as curvas de performance estimadas na prova:

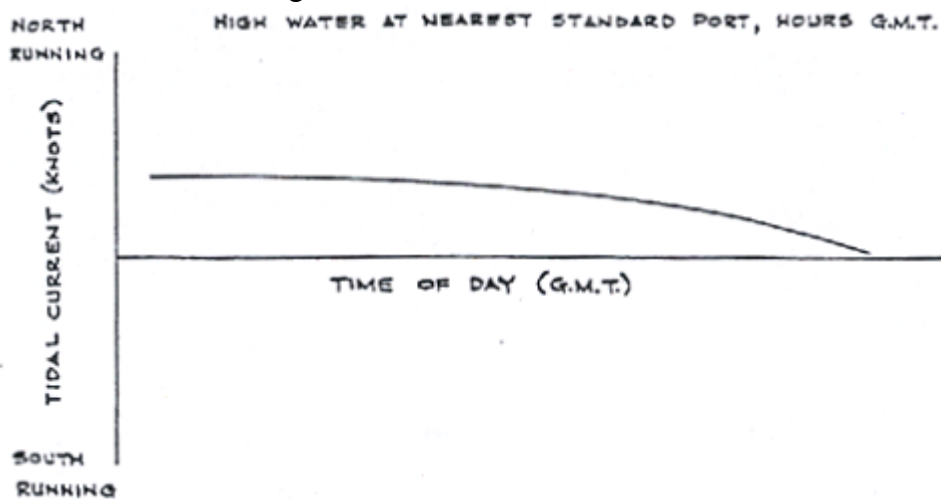
Figura 13: curvas de performance estimadas



Fonte: Guide for sea trials

E, por fim, o último gráfico requerido é o da curva de corrente final:

Figura 14: curva de corrente final

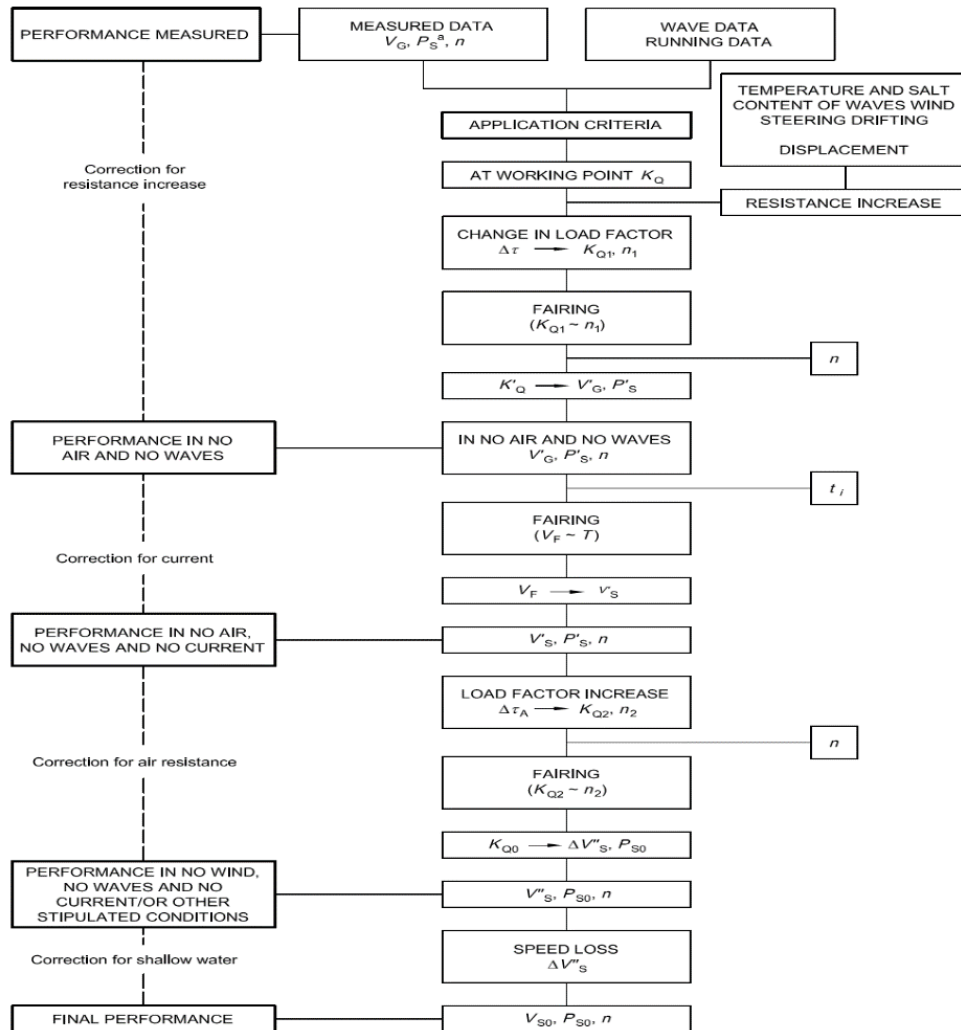


Fonte: Guide for sea trials

3.4.2 Análise e correção no padrão ISO 15016

O padrão ISO 15016 apresenta um esquema da sequência de correção na análise dos dados:

Figura 15: fluxograma de análise da prova de mar segundo a ISO 15016



Fonte: ISO 15016

3.4.2.1 Avaliação dos dados

Segundo a ISO 15016, antes da correção, deve-se calcular alguns fatores: a velocidade real do vento e sua direção, o coeficiente de torque, o fator de esteira e, por fim, a velocidade do navio para cada Corrida Dupla.

A velocidade real do vento e sua direção será calculada pelas fórmulas abaixo:

$$V_{WT} = \sqrt{V_{WR}^2 + V_G^2 - 2 \cdot V_{WR} \cdot V_G \cdot \cos(\psi_{WR})}$$

Onde:

V_{WT} = velocidade real do vento (m/s)

V_G = velocidade do navio (m/s)

V_{WR} = velocidade relativa do vento (m/s)

ψ_{WR} = direção relativa do vento (rad)

$$\psi_{WT} = \tan^{-1} \left[\frac{V_{WR} \cdot \sin(\psi_0 + \psi_{WR}) - V_G \cdot \sin(\psi_0)}{V_{WR} \cdot \cos(\psi_0 + \psi_{WR}) - V_G \cdot \cos(\psi_0)} \right]$$

Onde:

ψ_{WT} = direção real do vento (rad)

Ψ_0 = direção do curso do navio (rad)

O coeficiente de torque será calculado pela fórmula abaixo:

$$K_Q = \frac{1000}{2\pi} \cdot \frac{P_D}{\rho \cdot n^3 \cdot D^5} \cdot \eta_R$$

Onde:

$P_D = P_S \times \eta_T$ (kW)

P_D = potência entregue ao propulsor (kW)

D = diâmetro do propulsor (m)

n = rotação do propulsor (Hz)

P_S = potência no eixo (kW)

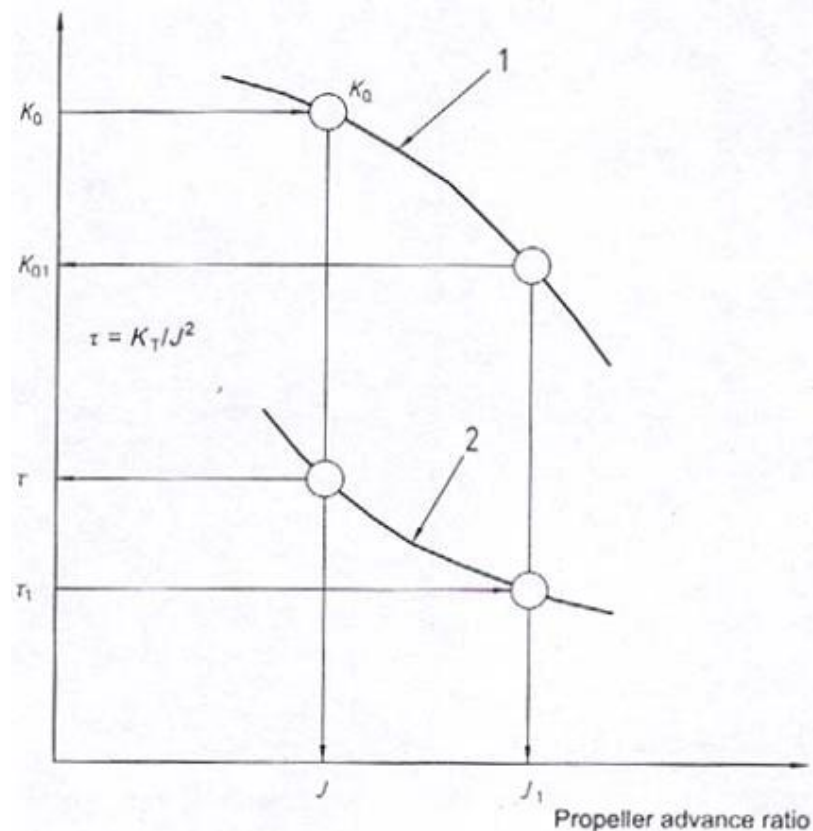
η_R = eficiência rotativa relativa (obtida, preferencialmente, dos testes com modelo)

η_T = eficiência de transmissão (obtida, preferencialmente, dos testes mecânicos)

ρ = densidade da água (kg/m³)

Desse modo, é possível mensurar a razão de avanço do propulsor J e o fator de carga $\tau = K_T/J^2$ usando o diagrama de características do propulsor em águas abertas, como mostram as curvas características do propulsor e ponto de operação, abaixo:

Figura 16: curvas características do propulsor e ponto de operação

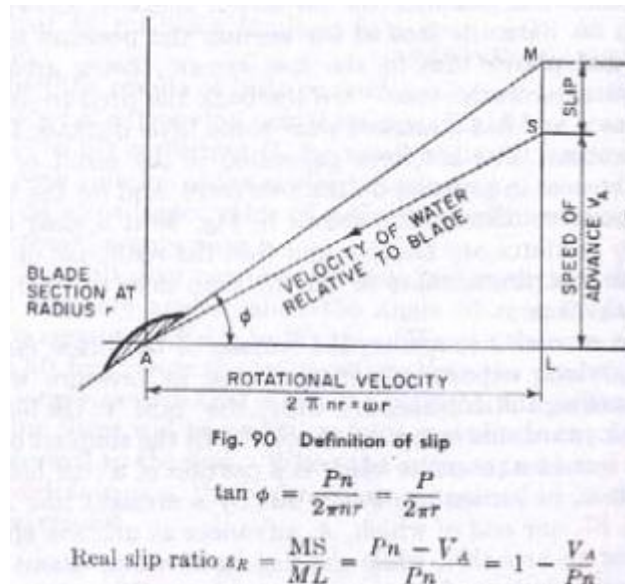


Fonte: ISO 15016

O fator τ é baseado na correlação do navio e dos dados de modelo correspondentes, para estimativa da potência do navio.

O deslizamento é a diferença entre a distância de avanço do propulsor em um fluido ideal, P_n , e a distância de avanço do propulsor em um fluido real (tal distância sendo menor que a primeira). A figura abaixo representa a razão de deslizamento:

Figura 17: razão de deslizamento



Fonte: Principles of Naval Architecture Volume II

O deslizamento será dado por:

$$S_R = 1 - \frac{D.J}{P}$$

Onde:

S_R = razão de deslizamento real

J = razão de avanço do propulsor

P = passo do propulsor (m)

V_A = velocidade de avanço (m/s)

E o fator de esteira será calculado pela fórmula abaixo:

$$1 - w = \frac{V_A}{V_G} = \frac{n.D}{V_G} . J$$

Onde:

V_G = Velocidade do navio (m/s)

w = fator de esteira

Sendo que o fator de esteira médio é a média dos fatores de esteira obtidos em cada corrida individual.

Deste modo, podemos calcular a velocidade do navio, para cada corrida dupla:

$$V_s = \frac{V_A}{(1-w)_m} = \frac{n.D}{(1-w)_m} . J$$

Onde:

$(1-w)_m$ = fator de esteira médio

No livro Principles of Naval Architecture, obtemos as relações pertinentes ao empuxo do propulsor, que depende de:

- (a) Densidade da água, ρ
- (b) Tamanho do propulsor, representado pelo diâmetro D
- (c) Velocidade de avanço, V_A
- (d) Aceleração da gravidade, g
- (e) Velocidade de rotação, n
- (f) Pressão do fluido, p
- (g) Viscosidade da água, μ

Então:

$$T = f(\rho^a D^b V_A^c g^d n^e p^f \mu^g)$$

Fazendo a análise dimensional, temos:

$$\frac{ML}{T^2} = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a (L)^b \left(\frac{L}{T}\right)^c \left(\frac{L}{T^2}\right)^d \left(\frac{1}{T}\right)^e \left(\frac{M}{LT^2}\right)^f \left(\frac{M}{LT}\right)^g$$

$$a = 1 - f - g$$

$$b = 1 + 3a - c - d + f + g$$

$$c = 2 - 2d - e - 2f - g$$

O que nos leva finalmente a:

$$T = \rho D^2 V_A^2 f \left[\left(\frac{gD}{V_A^2} \right)^d \left(\frac{nD}{V_A} \right)^e \left(\frac{p}{\rho V_A^2} \right)^f \left(\frac{v}{V_A D} \right) \right] \text{ onde } v = \mu/\rho$$

Sendo as expressões dentro dos colchetes adimensionais. Ou simplificando, podemos escrever que:

$$T \propto \rho D^2 V_A^2 . C$$

Sendo C uma constante adimensional.

Sabe-se que:

$$R_T = (1-t).T$$

Então podemos escrever:

$$R_T = (1-t)(\rho D^2 V_A^2) . \tau$$

$$R_T = \rho . D^2 . V_s^2 . (1-w)_m^2 . (1-t) . \tau$$

Onde:

$(1 - t)$ = fator de dedução de empuxo (determinado a partir da base de dados do projeto ou dos testes com modelo)

τ = fator de carga (constante adimensional da expressão)

Abaixo será apresentado um resumo das correções apresentadas pelo padrão ISO 15016.

3.4.2.2 Correção do vento

O padrão recomenda que as correções do aumento de resistência devido ao vento sejam feitas usando a fórmula abaixo:

$$R_{AA} = \frac{1}{2} \cdot \rho_A \cdot V_{WR}^2 \cdot C_{AA}(\psi_{WR}) \cdot A_{XV}$$

Sendo:

$$C_{AA}(\psi_{WR}) = C_{AA0} \cdot K(\psi_{WR})$$

Onde:

A_{XV} = área da seção transversal máxima exposta ao vento

$C_{AA}(\psi_{WR})$ = coeficiente de resistência de vento

C_{AA0} = coeficiente de resistência em vento de proa

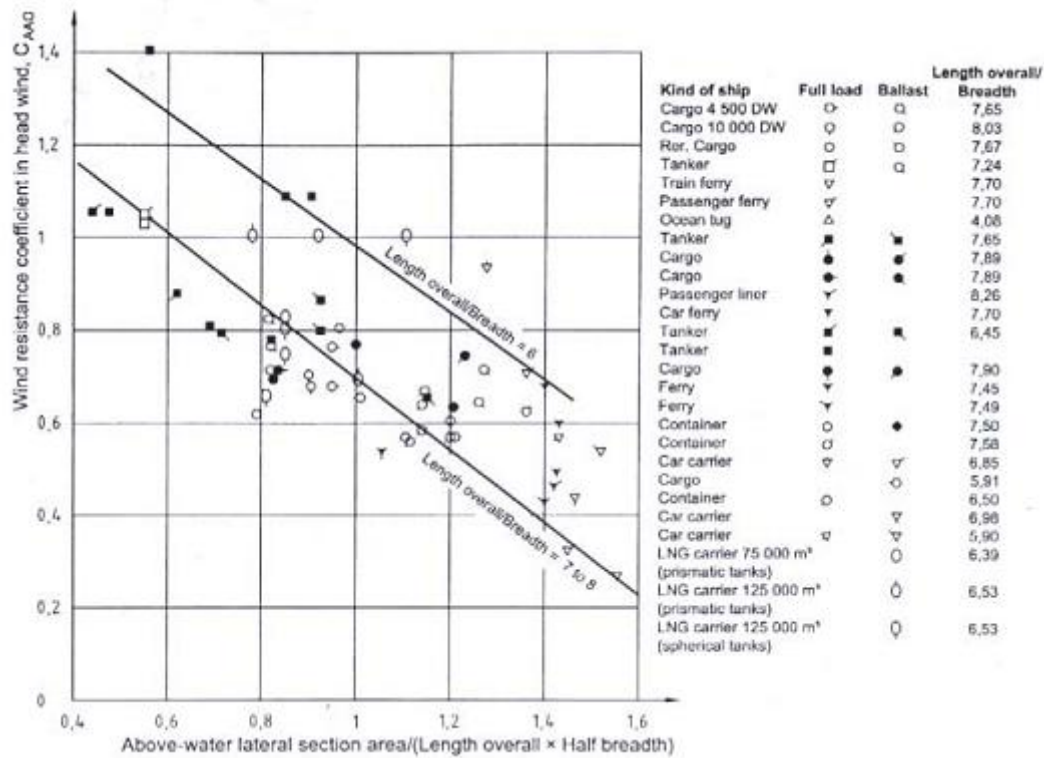
$K(\psi_{WR})$ = coeficiente direcional de resistência de vento

V_{WR} = velocidade relativa de vento

ρ_A = densidade do ar

C_{AA0} e $K(\psi_{WR})$ são obtidos em experimentos em túnel de vento. Abaixo, visualizamos o gráfico do coeficiente de resistência de vento em vento de proa:

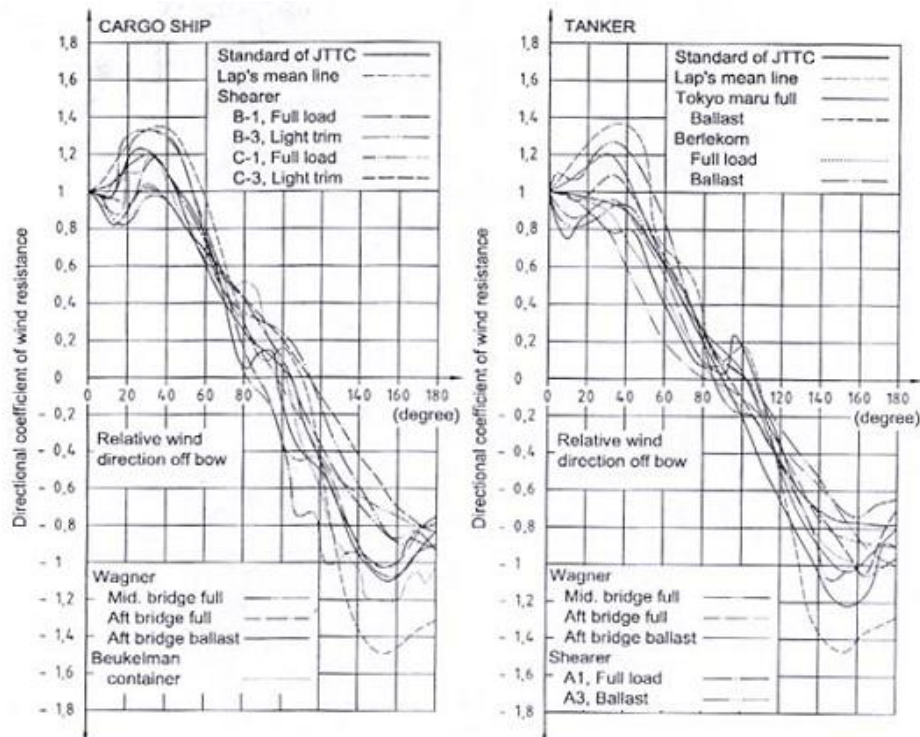
Figura 18: gráfico do coeficiente de vento em vento de proa



Fonte: ISO 15016

O próximo gráfico representa o coeficiente direcional de resistência de vento para navios de carga geral e navios tanque:

Figura 19: coeficiente direcional de resistência do vento



Fonte: ISO 15016

3.4.2.3 Correção de ondas

No ambiente de mar, as ondas são irregulares, e por isso suas dimensões devem ser registradas durante toda a prova, como já foi discutido. Mas com a função de resposta do navio em ondas regulares, pode-se obter o aumento da resistência em ondas regulares e com pequenas cristas:

$$R_{AW}(\chi) = 2 \cdot \int_{-\pi}^{\pi} G(\alpha - \chi) \cdot \left[\int_0^{\infty} S(f) \frac{\Delta r(f, \alpha)}{\zeta_A^2} df \right] d\alpha$$

Onde:

f = frequência da onda incidente elementar (1/s)

G = distribuição de direção das ondas incidentes

S(f) = distribuição de frequência das ondas incidentes (m²/s)

α = direção da onda incidente elementar (rad)

($\Delta r / \zeta_A^2$) = função resposta do aumento de resistência em ondas regulares (N/m²), como descrito no anexo B do padrão em questão

Lembrando que o espectro de ondas incidentes varia com o quadrado da altura de onda significativa. Por isso, deve-se realizar a prova em estados limitados de mar. No anexo B da ISO 15016, são apresentados diferentes métodos para se calcular a distribuição da frequências das ondas, inclusive para casos em que se apresenta swell.

3.4.2.4 Correção devido a temperatura da água e salinidade

Quando a temperatura e/ou salinidade da água divergem das condições especificadas, deve-se usar a fórmula abaixo para correção da resistência:

$$R_{AS} = R_{T0} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) - R_F \left(1 - \frac{C_{F0}}{C_F} \right)$$

Onde:

$$R_{T0} = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot V_S^2 \cdot S_W \cdot C_{T0}$$

$$R_F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_S^2 \cdot S_W \cdot C_F$$

R_{T0} = resistência total na temperatura da água e salinidade contratuais; deve ser derivada nos testes com modelo (N)

C_{T0} = coeficiente de resistência total para temperatura da água e salinidade contratuais

R_F = resistência friccional na temperatura da água e salinidade apresentadas na prova (N)

C_F = coeficiente de resistência friccional na temperatura da água e salinidade apresentadas na prova

C_{F0} = coeficiente de resistência friccional para temperatura da água e salinidade contratuais

ρ = densidade da água friccional na temperatura da água e salinidade apresentadas na prova (kg/m³)

ρ_0 = densidade da água friccional para temperatura da água e salinidade contratuais (kg/m³)

3.4.2.5 Correção devido a efeitos de governo (steering) e deriva

Para o aumento da resistência por efeitos de governo para manter o curso do navio, usa-se a formulação abaixo:

Para uma asa tridimensional:

$$C_L = f(\lambda) \cdot \delta_R$$

Considerando que:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot V_{\text{eff}}^2 \cdot A_R$$

$$R_{\delta\delta} = L \cdot \text{sen} \delta \cdot (1 - t_R)$$

E, para pequenos ângulos, o seno se aproxima do valor do ângulo correspondente, então:

$$R_{\delta\delta} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (1 - t_R) \cdot f_{\alpha}(\lambda_R) \cdot A_R \cdot V_{\text{eff}}^2 \cdot \delta_R^2$$

Onde:

$$V_{\text{eff}} = \frac{0,75 \cdot V_S}{(1 - S_R)} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot (1 - c_1 \cdot c_2) \cdot S_R + [1 - c_1 \cdot c_2 \cdot (2 - c_2)] \cdot S_R^2}$$

$$c_1 = \frac{D}{b_R}$$

$$c_2 = 0,8 \cdot (1 - w)_m$$

$$f_{\alpha}(\lambda_R) = \frac{6,13 \cdot \lambda_R}{2,25 + \lambda_R}$$

A_R = área do leme (m²)

b_R = envergadura do leme (m)

S_R = razão de deslizamento real

t_R = fator de redução de resistência devido ao governo (steering)

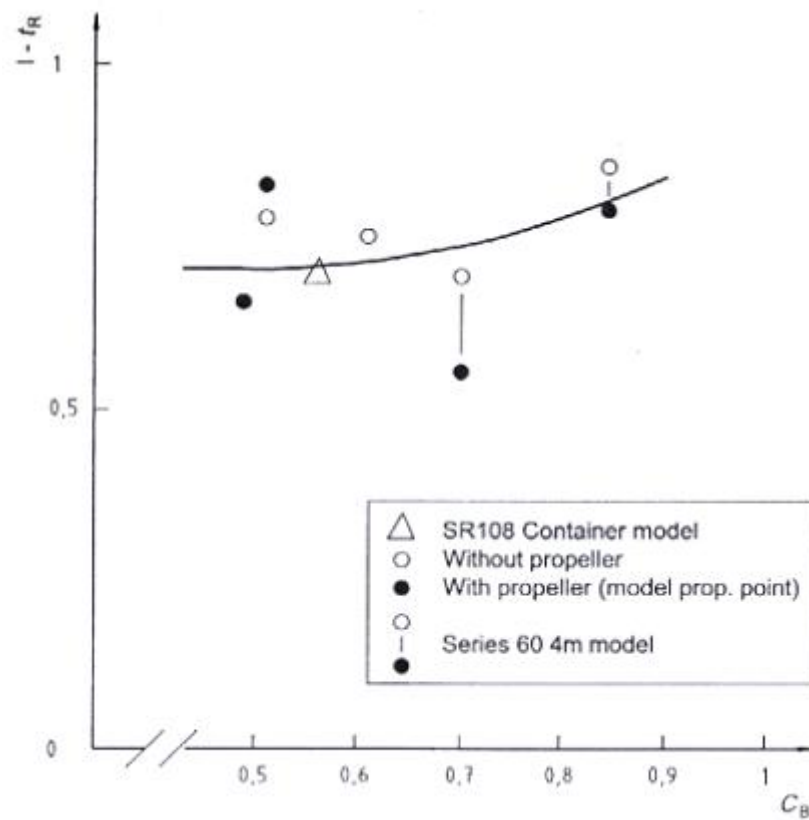
V_{eff} = velocidade de influxo efetiva para o leme (m/s)

δ_R = ângulo do leme (rad)

λ_R = razão de aspecto do leme

O fator de dedução de resistência devido ao governo (steering) pode ser obtido no gráfico abaixo:

Figura 20: gráfico do fator de dedução de resistência devido ao governo



Fonte: ISO 15016

O cálculo da resistência devido à deriva também é calculado de modo análogo:

$$R_{\beta\beta} = 0,25 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d^2 \cdot V_S^2 \cdot \beta^2$$

Onde:

β = ângulo de deriva (rad)

3.4.2.6 Correção devido ao deslocamento e ao trim

Existem casos em que a discrepância entre o deslocamento do navio na prova e o deslocamento requerido é grande. Nesse caso, deve-se fazer uma correção, como a apresentada a seguir:

$$R_{ADIS} = 0,65 \cdot R_T \left(\frac{\Delta_0}{\Delta} - 1 \right)$$

Onde:

$$R_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_S^2 \cdot S \cdot C_T$$

R_T = resistência total para as condições de prova derivadas dos testes com modelo (N)

Δ = deslocamento durante a prova

Δ_0 = deslocamento requerido

O modelo BSRA não apresenta correções para variação do trim. Mas se testes com modelo com deslocamento constante e variações de trim, devem-se referenciar esses resultados.

3.4.2.7 Correção devido ao aumento da resistência

Basta somar todas as resistências calculadas anteriormente:

$$\Delta R = R_{AA} + R_{AW} + R_{\delta\delta} + R_{\beta\beta} + R_{AS} + R_{ADIS}$$

R_{AA} = aumento de resistência devido ao vento (N)

R_{AW} = aumento de resistência devido às ondas (N)

$R_{\delta\delta}$ = aumento de resistência devido ao steering (N)

$R_{\beta\beta}$ = aumento de resistência devido à deriva (N)

R_{AS} = aumento de resistência devido às temperatura da água e salinidade (N)

R_{ADIS} = aumento da resistência devido à diferença no deslocamento (N)

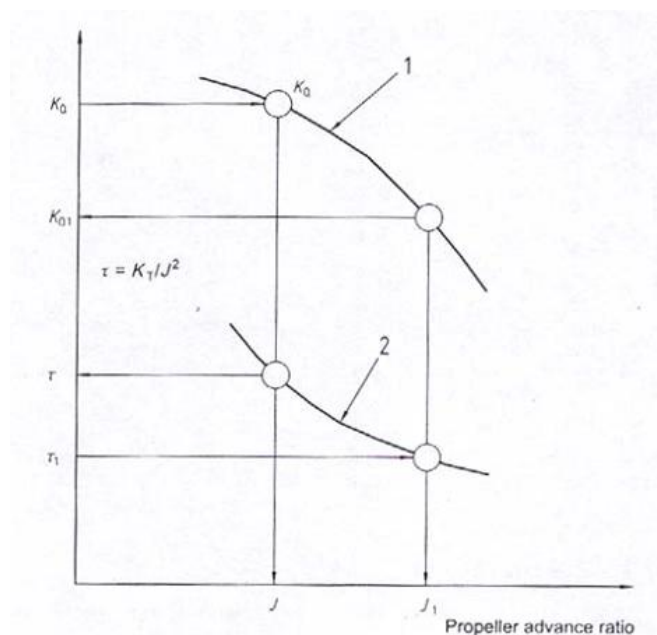
E existe uma relação entre resistência total, aumento da resistência e fator de carga:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta R}{R_T} \cdot \tau$$

$$\tau_1 = \tau - \Delta\tau$$

Como houve aumento da resistência, apresenta-se novamente o gráfico para se obter os valores de J_1 e K_{Q1} correspondentes a τ_1 :

Figura 21: gráfico K_Q versus J



Fonte: ISO 15016

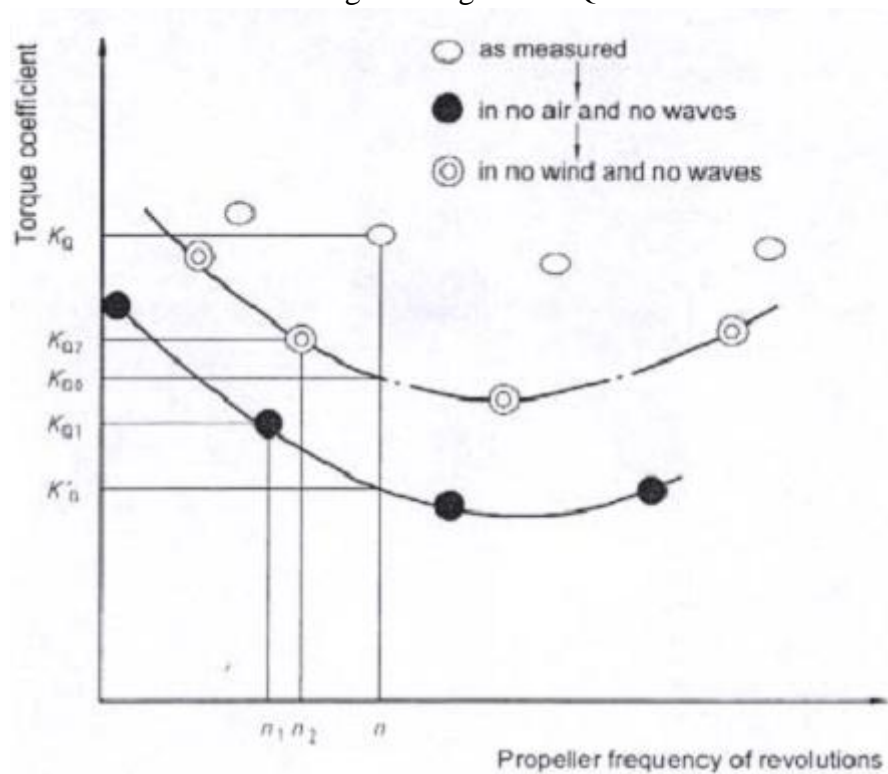
E a frequência de revoluções do propulsor n_1 será calculada por:

$$n_1 = n \cdot \frac{J}{J_1}$$

Um gráfico deve ser plotado com os valores de n_1 e K_{Q1} , como mostrado na figura abaixo, e a curva média $K_{Q1} \sim n_1$ é determinada usando-se o método dos quadrados mínimos ou equivalente. Abaixo são apresentadas as curvas de coeficiente de torque e rotações do propulsor:

Usando-se o diagrama, $K_Q'(n)$ é determinado e, a razão de avanço do propulsor $J'(K_Q')$ e o fator de carga $\tau'(K_Q')$ são obtidos através das curvas características do propulsor e ponto de operação.

Figura 22: gráfico K_Q versus n



Fonte: ISO 15016

Através disso, e, fazendo uma aproximação, podemos fazer:

$$a = \frac{J_H - J_L}{K_{QH} - K_{QL}}$$

$$b = \frac{J' - J}{K_Q' - K_Q}$$

$$a = b$$

$$a = \frac{J' - J}{K_Q' - K_Q}$$

$$J' - J = a \cdot (K_Q' - K_Q)$$

$$\Delta J = a \cdot (K_Q' - K_Q)$$

$$\frac{\Delta V_A}{nD} = a \cdot (K_Q' - K_Q)$$

$$\frac{\Delta V_G \cdot (1 - w)_m}{nD} = a \cdot (K_Q' - K_Q)$$

Então:

$$\Delta V_G = \frac{a \cdot D \cdot n \cdot (K_Q' - K_Q)}{(1 - w)_m}$$

Onde:

J_H = razão de avanço do propulsor em K_{QH} obtido no diagrama de características do propulsor

J_L = razão de avanço do propulsor em K_{QL} obtido no diagrama de características do propulsor

K_{QH} = valores mais altos acima do valor máximo mensurado de K_Q

K_{QL} = valores mais baixos abaixo do valor mínimo mensurado de K_Q

Finalmente, a velocidade do navio V_G' , a potência entregue no propulsor P_D' e a potência no eixo P_S' são calculadas pela formulação abaixo:

$$V_G' = V_G + \Delta V_G$$

$$P_D' = P_D \cdot \frac{K_Q'}{K_Q}$$

$$P_S' = \frac{P_D'}{\eta_T}$$

3.4.2.8 Correção devido aos efeitos de corrente

O histórico de tempo da corrente pode ser plotado calculando-se as velocidades médias da corrente no tempo intermediário de cada série de medições:

$$V_{FM} = \frac{V_{G(i+1)}'' - V_{G(i)}'}{2}$$

$$V_{G(i+1)}'' = V_{G(i+1)}' \cdot \frac{n_{(i)}}{n_{(i+1)}}$$

Onde:

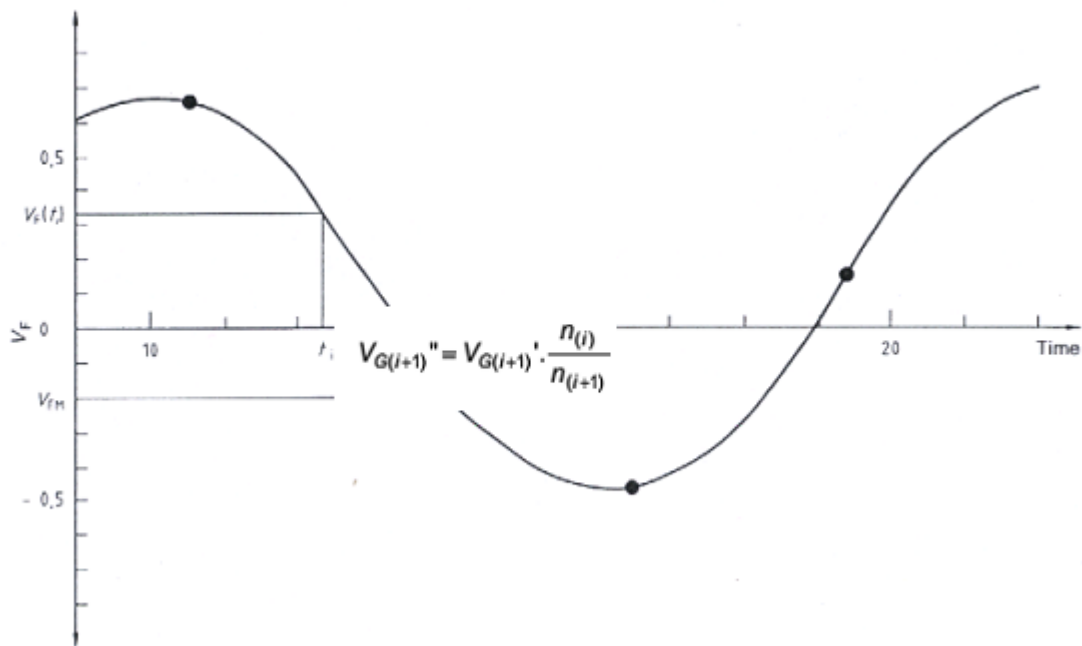
$n(i)$ = rotações do propulsor na corrida de número i (Hz) $n(i+1)$ = rotações do propulsor na corrida de número $i+1$ (Hz)

$V_{G(i+1)'} =$ velocidade do navio na corrida de número $i+1$ (m/s)

$V_{G(i+1)''} =$ velocidade do navio na corrida de número $i+1$ com rotação do propulsor igual a $n(i)$ (m/s)

Então obtemos:

Figura 23: velocidade da corrente versus tempo



Fonte: ISO 15016

A velocidade do navio sob efeito da corrente será dada por:

$$V_S' = V_G' + V_F$$

3.4.2.9 Correção devido aos efeitos da resistência do ar

Lembrando da análise da relação encontrada no item 2.4.2.1, obtemos:

$$\tau = \frac{R}{\rho \cdot D^2 \cdot (1-t) \cdot (1-w)_m^2}$$

Então, a mudança do fator de carga para uma corrida sem vento será dado por:

$$\Delta \tau_A = \frac{\rho_A \cdot A_{XV} \cdot C_{AA0}}{2 \cdot \rho \cdot D^2 \cdot (1-t) \cdot (1-w)_m^2}$$

Onde:

A_{XV} = área seccional acima da linha d'água (área da porção do navio acima da linha d'água projetada, normalmente, para a direção longitudinal do navio em m²)

C_{AA0} = coeficiente de resistência de vento em vento de proa

ρ_A = densidade do ar (kg/m³)

Logo, o fator de carga corrigido será:

$$\tau_2 = \tau' + \Delta\tau_A$$

A frequência de revoluções do propulsor será obtida pela relação abaixo:

$$n_2 = n \cdot \frac{J'}{J_2}$$

Onde:

J_2 = razão de avanço do propulsor correspondente ao fator de carga τ_2

Para cada n_2 obtém-se um ponto onde uma curva de coeficientes de torque versus rotações do propulsor é determinada utilizando-se o método dos quadrados mínimos ou equivalente.

Para calcular a correção da velocidade do navio devido aos efeitos de resistência do ar para cada corrida sem vento, utiliza-se a fórmula abaixo:

$$\Delta V_S' = \frac{aDn(K_{Q0} - K_Q')}{(1-w)_m}$$

Onde:

K_{Q0} = coeficiente de torque correspondente à rotação n

A velocidade do navio V_S'' , a potência entregue do propulsor P_{D0} e a potência no eixo P_{S0} , quando o navio corre com rotação n e em condição sem vento, sem ondas e sem corrente, são dadas por:

$$V_S'' = V_S' - \Delta V_S' \quad P_{D0} = P_D \cdot \frac{K_{Q0}}{K_Q} \quad P_{S0} = \frac{P_{D0}}{\eta_T}$$

3.4.2.10 Correção devido a águas rasas

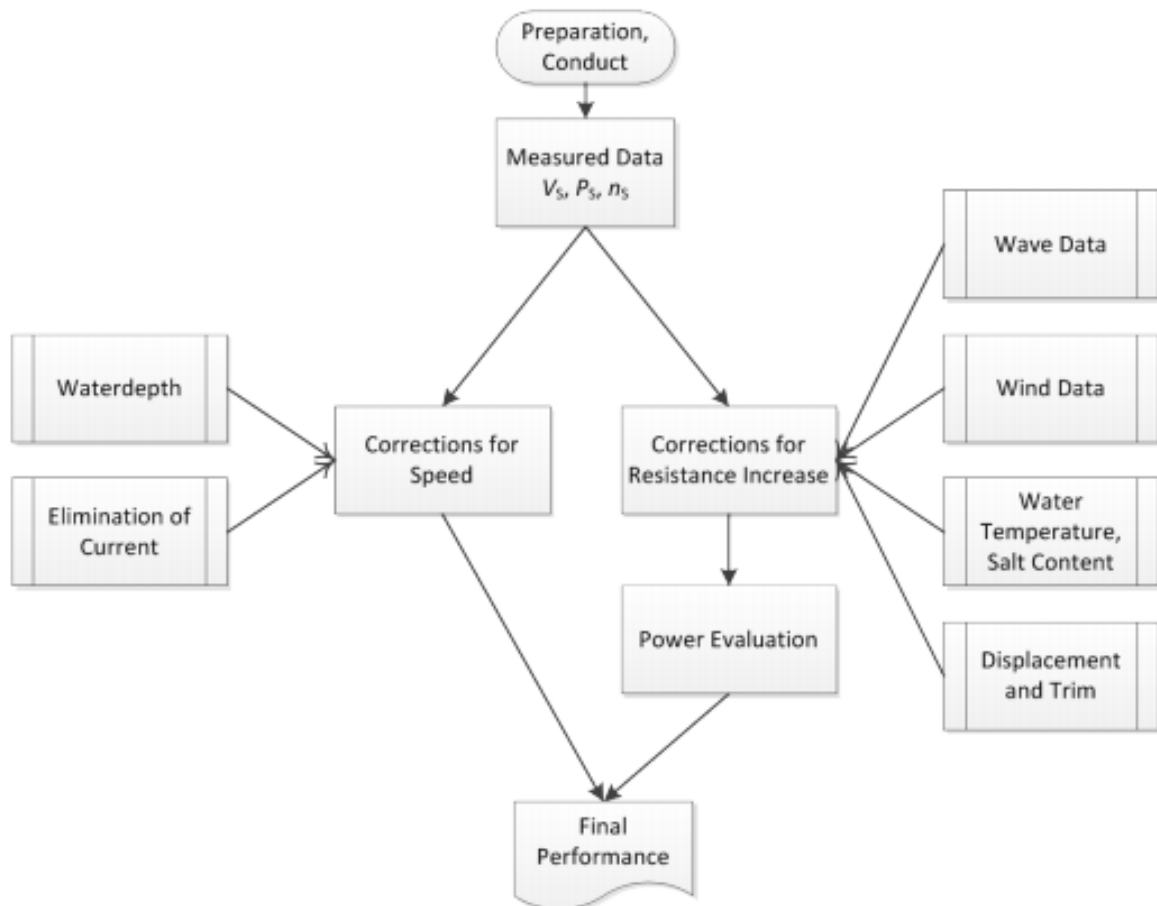
É o mesmo descrito para o padrão BSRA. A velocidade corrigida de efeitos de águas rasas será dada por:

$$V_{S0} = V_S'' + \Delta V_S''$$

3.4.3 Análise e correção no padrão ITTC 2012

A ITTC se baseia no seguinte diagrama para proceder as correções:

Figura 24: fluxograma da análise dos dados da prova de velocidade segundo a ITTC 2012



Fonte: ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Speed and Power Trials, Part 2 - Analysis of Speed/Power Trial Data

3.4.3.1 Avaliação dos dados

Consiste em calcular a resistência do navio para cada corrida, usando os dados obtidos na prova, as curvas características do propulsor, a eficiência rotativa relativa e o fator de dedução de empuxo.

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$$

Onde:

Q = torque mensurado para cada corrida

n = razão de revolução mensurada para cada corrida

ρ = densidade da água

D = diâmetro do propulsor em escala real

$$K_Q' = \frac{K_Q}{\eta_R}$$

Onde:

η_R = eficiência rotativa relativa (obtido com modelos, estatísticas ou convencionar igual a 1)

Entra K_Q' no diagrama de características do propulsor para achar o valor de K_T e, assim, o empuxo T .

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$$

$$T = K_T \cdot (\rho \cdot n^2 \cdot D^4)$$

Onde:

T = empuxo deduzido a partir das características do propulsor em águas abertas

n = razão de revolução para densidade da água em cada corrida

ρ = densidade da água

D = diâmetro do propulsor em escala real

Calcula-se então a resistência:

$$R = T \cdot (1 - t)$$

Onde:

R = resistência

t = fração de dedução de empuxo derivado dos testes com modelo ou estatísticas; fator de dedução do empuxo deve variar como função de diferentes cargas do propulsor.

Agora faremos as diversas correções de vento, ondas, temperatura da água, densidade da água, aproamento, deriva, deslocamento e trim.

3.4.3.2 Correção devido aos efeitos de vento

Faz-se do mesmo modo que a ISO 15016 recomenda.

3.4.3.3 Correção devido aos efeitos de ondas

Faz-se do mesmo modo que a ISO 15016 recomenda. Porém, a ITTC ainda apresenta uma fórmula, aplicável em certos casos, para ondas de proa entre 1,5 e 2 metros:

$$\Delta R_T = 0,64 \cdot \xi_w^2 \cdot B^2 \cdot C_B \cdot \rho \cdot \frac{1}{L}$$

Onde:

ξ_w = altura de onda (m)

B = boca (m)

C_B = coeficiente de bloco

ρ = peso específico da água (N/m³)

L = comprimento do navio (m)

3.4.3.4 Correção devido aos efeitos da temperatura da água e da salinidade

Análise dos resultados obtidos na prova de acordo com o padrão ISO 15016.

3.4.3.5 Correção devido aos efeitos de governo (steering) e deriva

Análise dos resultados obtidos na prova de acordo com o padrão ISO 15016.

3.4.3.6 Correção devido aos efeitos do deslocamento e do trim

Análise dos resultados obtidos na prova de acordo com o padrão ISO 15016. Mas, para casos em que a diferença de deslocamento é pequena, pode-se usar a fórmula abaixo:

$$\frac{P_1}{V_1^3 \cdot D_1^{2/3}} = \frac{P_2}{V_2^3 \cdot D_2^{2/3}}$$

Onde:

P₁ = potência correspondente ao deslocamento D₁

P₂ = potência correspondente ao deslocamento D₂

V₁ = velocidade correspondente ao deslocamento D₁

V₂ = velocidade correspondente ao deslocamento D₂

3.4.3.7 Correção devido aos efeitos de corrente

Análise dos resultados obtidos na prova de acordo com o padrão ISO 15016.

3.4.3.8 Correção devido aos efeitos de águas rasas

Análise dos resultados obtidos na prova de acordo com o padrão BSRA.

3.4.3.9 Cálculo da potência corrigida

Agora calcula-se o empuxo associado com o valor da resistência corrigida:

$$T = K_T \cdot (\rho \cdot n^2 \cdot D^4)$$

Com K_T/J^2 sendo um input para as características do propulsor em águas abertas, os valores relacionados de K_Q' e J podem ser determinados. Sabendo-se η_R , K_Q é obtido.

$$K_Q = K_Q' \cdot \eta_R$$

Conhecendo J e o coeficiente de esteira w, pode-se calcular o valor correto da rotação. Obtém-se o coeficiente de esteira nos testes com modelo ou estatísticas.

Para calcular a P_B (break power) a partir da potência no eixo P_S, considera-se as perdas mecânicas na caixa redutora que, por sua vez, são obtidas a partir de informações dos fabricantes.

Para se obter a potência entregue PD também da potência de eixo, considera-se as perdas mecânicas nos mancais intermediários. Tais perdas são normalmente, no mínimo, 0,5% por mancal.

Abaixo, as fórmulas correspondentes:

$$T_{corr} = \frac{R_{Tcorr}}{1-t}$$

Onde:

T_{corr} = empuxo corrigido para cada corrida

R_{Tcorr} = resistência corrigida para cada corrida

t = fator de dedução de empuxo, mensurado a partir dos testes com modelo ou estatísticas

$$\left(\frac{K_T}{J^2}\right)_{corr} = \frac{T}{\rho \cdot V_e^2 \cdot D^2}$$

Onde:

T_{corr} = empuxo corrigido para cada corrida

ρ = densidade da água

V_e = velocidade de avanço

D = diâmetro do propulsor

$$V_e = V_S(1-w)$$

Onde:

V_S = velocidade do navio mensurada em cada corrida

w = coeficiente de esteira, mensurado a partir dos testes com modelo ou estatísticas

$$J_{corr} = \frac{V_e}{n_{corr} \cdot D}$$

$$n_{corr} = \frac{V_e}{J_{corr} \cdot D}$$

Onde:

J = coeficiente de avanço

n_{corr} = rotação do propulsor corrigida (1/s)

$$P_D = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot n_{corr}^3 \cdot D^5 \cdot K_{Qcorr}$$

Onde:

P_D = potência entregue ao propulsor

K_{Qcorr} = K_Q corrigido

$$P_B = \frac{P_D}{\eta_m}$$

Onde:

P_B = break power

n_m = eficiência mecânica, considerando perdas mecânicas no eixo e caixa redutora

4 PROVA DE MANOBRA

Nessa parte da prova de mar, as condições contratuais não são mais preocupação. Agora, serão estudadas as capacidades de manobra do navio.

A IMO A.751 estabelece os critérios a serem estudados na prova de manobra:

- ➔ Capacidade de giro (turning ability) – o avanço não deverá exceder 4,5 comprimentos do navio (L) e o diâmetro tático não deverá exceder 5 comprimentos do navio em curva de giro;
- ➔ Capacidade de giro inicial (initial turning ability) – com a aplicação de 10^0 no ângulo do leme para BB/BE, o navio não deverá percorrer mais que 2,5 vezes o comprimento do navio ao mesmo tempo que o rumo na superfície varie 10^0 do rumo inicial;
- ➔ Capacidade de guinada e estabilidade direcional (yaw checking ability) –
 - O valor do primeiro ângulo de overshoot na manobra zig-zag $10^0/10^0$ não deverá exceder:
 - 10^0 se L/V é menor que 10 segundos;
 - 20^0 se L/V é 30 segundos ou mais; e
 - $[5 + 0,5(L/V)]$ graus se L/V estiver entre 10 e 30 segundos.
 - O valor do segundo ângulo de overshoot na manobra zig-zag $10^0/10^0$ não deverá exceder os critérios acima por mais de 15^0 .
 - O valor do primeiro ângulo de overshoot na manobra zig-zag $20^0/20^0$ não deverá exceder 25^0 .
- ➔ Capacidade de parar (stopping ability) – o alcance da trajetória no teste de parada com toda força a ré não deve exceder 15 comprimentos do navio. Contudo, esse valor pode ser modificado pela Administração onde os navios de grande deslocamento fazem esse critério impraticável.

Os testes a serem listados a seguir avaliam essas habilidades de diferentes formas. A IMO A.751 exige que sejam feitos os testes de zig-zag, curva de giro e teste de parada brusca, as únicas analisadas qualitativamente. As outras que serão apresentadas são analisadas somente qualitativamente.

4.1 Tipos de manobras

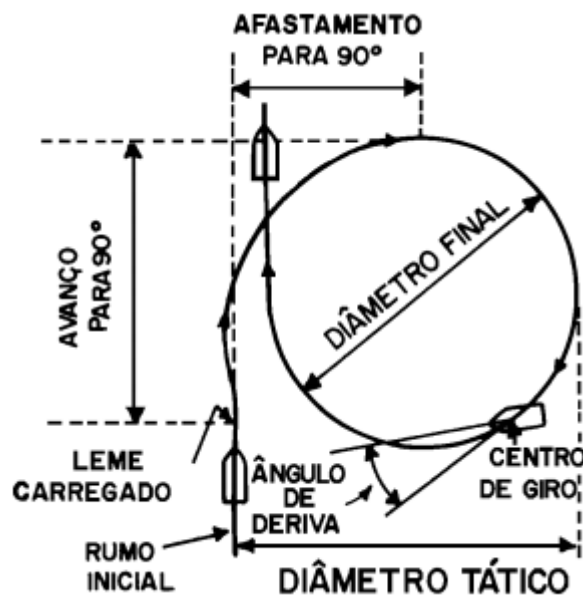
4.1.1 Curva de giro (turning circle)

Durante as provas de mar de um navio, é efetuado um certo número de giros completos, sob diferentes condições de velocidade e ângulo de leme, sendo registrados em tabelas e gráficos os resultados obtidos. Realiza-se testes de curva de giro para avaliar a habilidade de giro do navio. Normalmente os seguintes elementos são registrados:

- ➔ Curva de giro– é a trajetória descrita pelo centro de gravidade de um navio numa evolução de 360^0 , em determinada velocidade e ângulo de leme.
- ➔ Avanço– é a distância medida na direção do rumo inicial, desde o ponto em que o leme foi carregado até a proa ter guinado para o novo rumo. O avanço é máximo quando a guinada é de 90^0 .

- Afastamento— é a distância medida na direção perpendicular ao rumo inicial, desde o ponto em que o leme foi carregado até a proa ter atingido o novo rumo.
- Abatimento— é o caimento do navio para o bordo contrário ao da guinada, no início da evolução, medido na direção normal ao rumo inicial. Há um questionamento sobre a nomenclatura desse dado, pois pode confundir com o “abatimento” devido aos efeitos de corrente e vento em uma derrota. No livro “Arte Naval” e no livro “Navegação: a Ciência e a Arte”, essa é a nomenclatura. O Principles of Naval Architecture nem considera essa característica na análise da curva de giro.
- Diâmetro tático – é a distância medida na direção perpendicular ao rumo inicial, uma guinada de 180°. O diâmetro tático corresponde ao afastamento máximo.
- Diâmetro final – é o diâmetro do arco de circunferência descrito na parte final da trajetória pelo navio que girou 360° com um ângulo de leme constante. É sempre menor que o diâmetro tático. Se o navio continuar a evolução além de 360°, com o mesmo ângulo de leme, manterá sua trajetória nessa circunferência.
- Ângulo de deriva— é o ângulo formado, em qualquer ponto da curva de giro, entre a tangente a essa curva e o eixo longitudinal do navio.

Figura 25: esquema da curva de giro



Fonte: Navegação: a Ciência e a Arte

Segundo a ITTC, esse teste é realizado com velocidade e ângulo de leme máximos e depois com velocidade máxima e ângulo de leme igual a 15°.

Já a IMO A.751 recomenda-se que o teste seja feito com velocidade de aproximação e ângulo de leme máximo e velocidade de aproximação e ângulo de leme igual a 35°.

4.1.2 Manobra de zig-zag (Z-manoeuvre test)

O testes de zig-zag é realizado para se avaliar as habilidade de giro inicial e de guinada do navio. Neste teste, um determinado ângulo de leme δ é aplicado, alternadamente, para ambos os bordos, até que um aproamento conhecido, e pré-determinado, seja alcançado.

Após a aproximação, o leme é virado δ graus para boreste (primeira execução). Quando o curso estiver a Ψ do curso inicial, o leme é revertido até o mesmo ângulo δ para bombordo (segunda execução). O processo continua até que sejam feitas 5 (cinco) execuções, segundo a

ITTC. Depois que a reversão é aplicada, o navio continua na mesma direção original até que, lentamente, começa a responder à mudança do ângulo do leme.

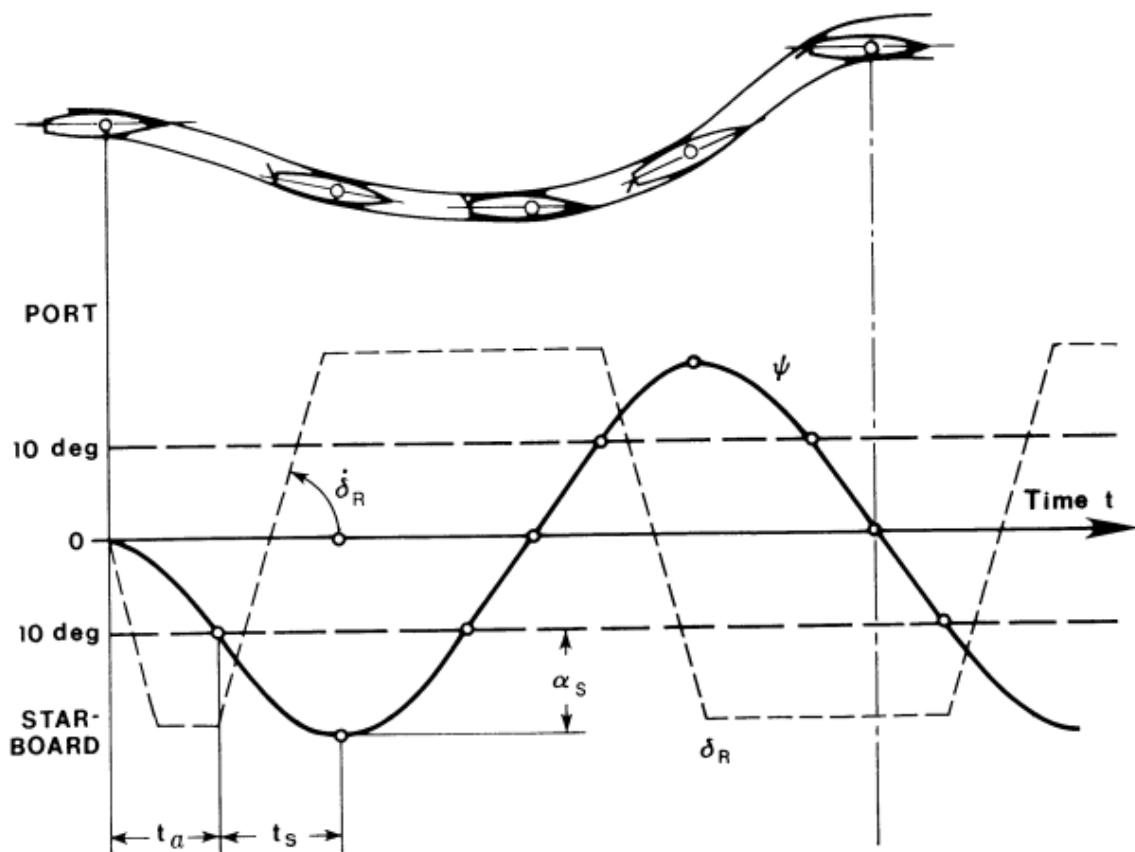
Manobras deste tipo utilizam, normalmente, valores de δ/Ψ iguais a 10/10 e 20/20, porém, pode-se aplicar outras combinações.

Segundo a ITTC, deve-se realizar o teste na velocidade de aproximação e, se possível, na velocidade média.

As informações obtidas são as seguintes:

- Tempo de giro inicial (t_a)
- Ângulo de aproamento de execução (Ψ)
- Ângulo de overshoot
- Tempo de guinada (t_s , t_B)
- Aproamento (ψ)
- Alcance (t_A)
- Tempo de um giro completo (T)
- Velocidade angular ($\dot{\Psi}$)
- Unidade de tempo

Figura 26: dados obtidos na manobra de zig-zag



Fonte: ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Full Scale Measurements Manoeuvrability - Full Scale Manoeuvring Trials

Dessa se derivam outras duas manobras:

- Zig-zag modificada (modified Z-maneuvre test) – para testar a estabilidade dinâmica e a capacidade de giro inicial da embarcação. O ângulo de aproamento de

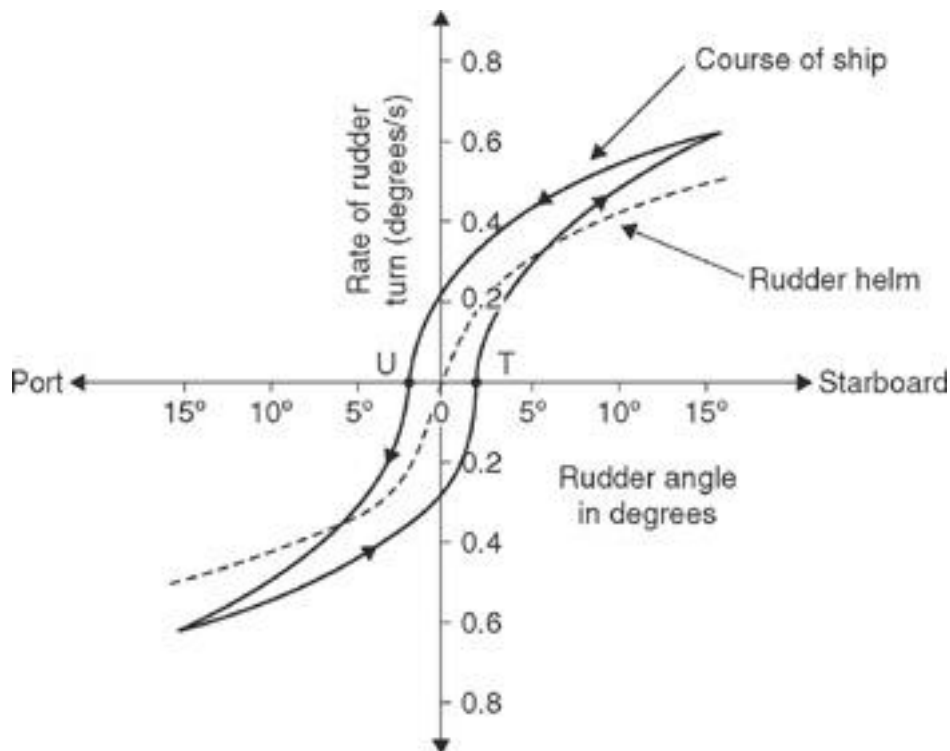
execução é escolhido para ser tão pequeno quanto um grau, e o ângulo de leme para ser igual a cinco ou dez graus.

- Zig-zag em baixa velocidade (Z-manoevre at low speed test) - analisa a estabilidade dinâmica do navio e a sua capacidade de manter o curso. O navio corre, por inércia, depois de uma parada do motor principal. Quando a velocidade da embarcação chega a ser menor que 5 (cinco) nós, uma manobra 35/5 é iniciada. Repete-se o procedimento até que o curso do navio não reaja às ações do leme.

4.1.3 Manobra espiral (spiral manoeuvre)

Essa manobra é realizada para avaliar, qualitativamente, a estabilidade direcional da embarcação e a sua capacidade de manter o curso. Para navios, que demonstram características estáveis, tanto no método de espiral direto quanto reverso podem ser utilizados para obter resposta a ângulos de leme pequenos. Para navio instáveis, porém, recomenda-se a espiral reversa.

Figura 27: dados obtidos na manobra espiral



Fonte: ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Full Scale Measurements Manoeuvrability - Full Scale Manoeuvring Trials

- Manobra espiral direta (direct spiral manoeuvre) - Com o navio em um determinado curso inicial, o leme é virado a 25° para boreste e é mantido até que a razão de mudança do aproamento seja constante, ou seja, até que ele inicie uma curva de giro. O ângulo de leme é, então, diminuído em 5° e, mais uma vez, mantido até que o navio alcance condições estáveis de guinada. Tal procedimento é repetido até que o leme tenha chegado até 25° no bordo oposto para, então, voltar.
- Manobra espiral reversa (reverse spiral manoeuvre) - Na espiral reversa, o navio é mantido em uma razão de giro constante e o ângulo de leme médio requerido para produzir esta guinada é mensurado. A ITTC recomenda que as flutuações do leme

em torno do valor médio não devem exceder ± 4 graus, porém, na prática, consegue-se um desvio de ± 2 graus.

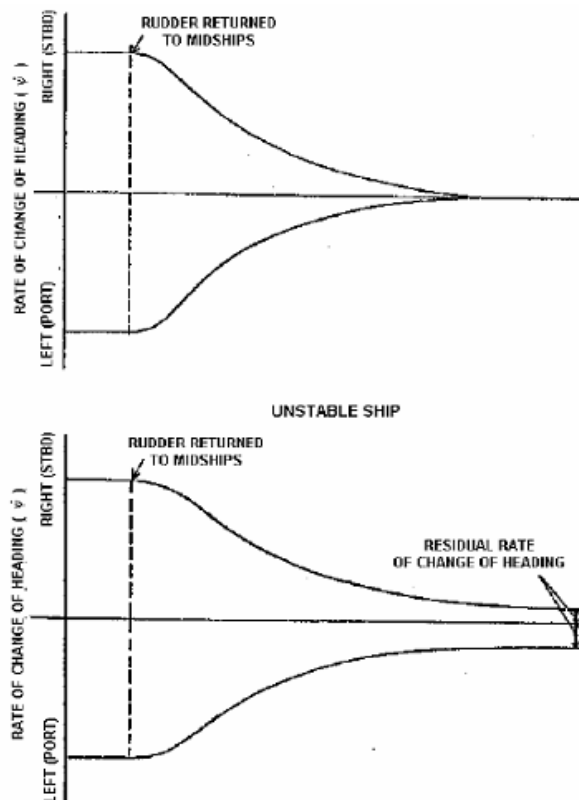
4.1.4 Teste Pull-out (pull-out test)

Para analisar a estabilidade dinâmica da embarcação. Um ângulo de leme de, aproximadamente, 20 graus é aplicado até que o navio alcance uma razão de giro constante.

Neste momento, retorna-se o leme ao ângulo zero. Se o navio é estável, a razão de guinada decairá até zero e, se o navio é instável, a razão de giro reduzirá-se a um valor residual da razão de guinada.

Tais manobras devem ser conduzidas tanto para bombordo, quanto para boreste, para mostrar uma possível assimetria. Estas podem ser realizadas no final de um teste zig-zag ou curva de giro.

Figura 28: comparação na manobra entre um navio estável e um navio instável



Fonte: ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Full Scale Measurements Manoeuvrability - Full Scale Manoeuvring Trials

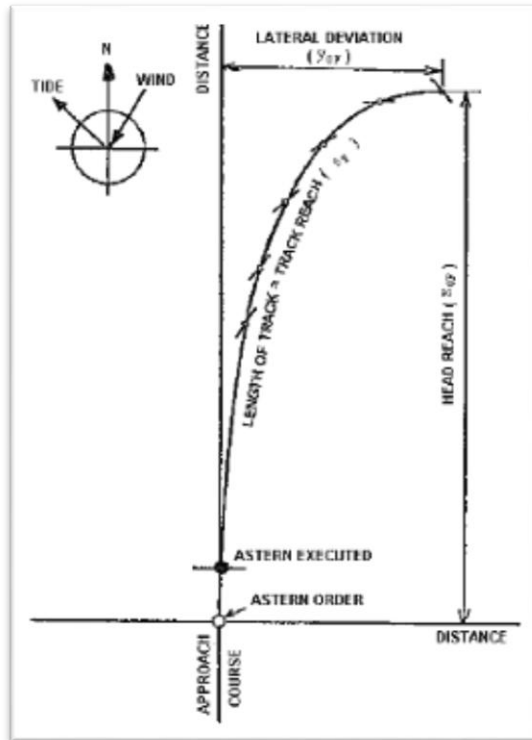
4.1.5 Teste de parada brusca (crash stopping test)

É realizado para se avaliar a capacidade de parar do navio. Os parâmetros registrados nos testes de parada e parada brusca são:

- Alcance a vante
- Distância total percorrida
- Deriva

A velocidade do navio é reduzida, geralmente, de uma velocidade máxima a vante, até a velocidade nula, aplicando-se potência total a ré após a condição de aproximação ser satisfeita.

Figura 29: curva descrita pelo navio em uma parada brusca



Fonte: ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Full Scale Measurements Manoeuvrability - Full Scale Manoeuvring Trials

4.1.6 Teste de parada inercial (stopping inertia test)

Os testes são realizados para avaliar a capacidade de parar do navio e o seu comportamento durante uma desaceleração, sem a ação do propulsor.

Iniciando com velocidade máxima a vante, o motor é parado rapidamente. Quando a velocidade a vante do navio é reduzida a 5 (cinco) nós, o teste está completo.

Os dados registrados durante o teste são:

- Alcance a vante
- Distância total percorrida
- Deriva
- Duração da manobra

4.1.7 Teste de homem ao mar (man-overboard test)

Estes testes são realizados para se analisar a habilidade de guinada do navio e a habilidade de giro.

Através das manobras de homem ao mar são obtidas informações sobre o tempo e o desvio do curso necessários para resgatar uma pessoa ou um objeto do mar. As curvas elíptica e de Williamson são dois testes muito conhecidos. Tais manobras, na ausência de vento e corrente, fazem com que o navio retorne à posição onde o incidente ocorreu.

Pode-se ver, abaixo, os dados obtidos nos testes:

- Uma plotagem do trajeto do navio

- O tempo levado até se chegar ao ponto, ou próximo deste, onde o teste foi iniciado
- O desvio lateral em relação ao ponto em que o teste foi iniciado

4.1.8 Manobra de curso paralelo (parallel course manoeuvre test)

A manobra de curso paralelo é realizada para analisar a habilidade de guinada e a capacidade de giro do navio.

Com o navio, inicialmente, em sua velocidade de aproximação, move-se o leme, rapidamente, para boreste e o mantém assim até que o navio tenha alterado o seu curso em 15°, em relação ao curso inicial. Neste instante, move-se o leme, rapidamente, para bombordo.

Quando o navio reassumir o curso inicial, move-se o leme para meio-navio. Deve-se repetir o teste para ângulos iguais a 45° e 90°, em relação ao curso inicial.

Os dados a serem registrados são:

- Uma plotagem do trajeto do navio
- O tempo levado para assumir o curso paralelo
- O desvio lateral entre as posições inicial e final

4.1.9 Teste de curva inicial (initial turning test)

O teste de curva inicial é realizado para se analisar a capacidade de giro inicial do navio.

Com o navio, inicialmente, em sua velocidade de avanço, move-se o leme, rapidamente, para 10° e o mantém assim até que o navio tenha alterado o seu curso em 10°, em relação ao curso inicial.

Os dados a serem registrados são os seguintes:

- Uma plotagem do trajeto do navio
- Distância total percorrida

Pode-se obter tais dados na fase inicial de uma manobra zig-zag 10/10, antes da segunda execução.

4.1.10 Teste de curva de aceleração (accelerating turning test)

O teste de curva de aceleração é realizado para se analisar a capacidade de giro do navio.

Para a manobra, o navio deve estar, inicialmente, com velocidade nula e propulsor parado. Inicia-se o teste virando-se o leme até atingir seu ângulo máximo e ordenando meia força a vante. O ângulo de leme e a potência do motor são mantidos constantes durante a corrida. A curva continua até que o navio altere seu curso em 180°.

As informações a serem obtidas são:

- Diâmetro tático
- Avanço
- Transferência
- Velocidade final
- Tempo para uma mudança de curso igual a 90°
- Tempo para uma mudança de curso igual a 180°

Avanço máximo e transferência máxima podem ser obtidos também.

Pode-se registrar os três primeiros dados em forma adimensional, dividindo-os pelo comprimento entre perpendiculares do navio em questão.

4.1.11 Teste do thruster (thruster test)

Para navios com thrusters laterais, recomenda-se os seguintes testes para se analisar a capacidade de guinada e a capacidade de giro:

4.1.11.1 Manobra de giro (turning manoeuvre)

Com o navio, inicialmente, em velocidade baixa (entre 0 e 8 nós), ordena-se potência máxima aos thrusters e mantém-se o leme a meio-navio. Deve-se continuar a manobra até que o navio tenha alterado o seu curso em 90°. Deve-se realizar o teste tanto para bombordo, quanto para boreste, e as condições iniciais incluem o navio estar com a proa orientada diretamente para o vento.

Os dados a serem obtidos durante a manobra são:

- Avanço
- Transferência
- Velocidade final
- Tempo para uma mudança de curso igual a 90°

Sendo que os dois primeiros também devem ser apresentados em suas formas adimensionais, dividindo-os pelo comprimento entre perpendiculares do navio.

4.1.12 Crabbing test

O crabbing test é realizado para analisar a capacidade de giro inicial do navio.

Deve-se utilizar todos os propulsores, lemes e thrusters disponíveis para a realização do teste. Obviamente, de acordo com esta definição, um navio convencional com apenas um propulsor, um leme e nenhum thruster não pode realizar o teste.

A informação principal a ser obtida deste teste é a velocidade transversal do navio. Porém, deve-se documentar, também, a velocidade longitudinal e a mudança do aproamento, apesar de estas terem de ser mantidas as mais baixas possíveis.

Deve-se registrar a utilização do propulsor(es), leme(s) e thruster(s), incluindo-se potência, rpm, passo, ângulo de leme, etc.

Deve-se realizar o teste em condições ambientais amenas (sem vento e ondas). Se o vento exceder o grau 2 da escala Beaufort, deve-se realizar a manobra em direções a favor e contra o vento. Condições de vento, corrente e mar devem ser documentados.

4.2 Condições limites da prova

Assim como na prova de velocidade, os efeitos ambientais podem influenciar significativamente os resultados de uma prova de manobra.

Para que os resultados possam ser avaliados sem a necessidade de correções, seguem abaixo os limites dentro dos quais os ajustes não são necessários.

4.2.1 Localização da prova

A manobrabilidade de um navio é fortemente afetada pelas interações com o fundo, pelo fluxo de outras embarcações, pelo vento e pelas ondas. Desta maneira, a localização da prova deve ser definida em regiões onde a água possui profundidade adequada, com influência mínima de corrente e maré. Além disso, a prova deve ser realizada em condições ambientais mais amenas e constantes.

4.2.2 Vento

A ITTC diz que as provas devem ser realizadas com o mínimo de vento e ondas possível. Recomenda-se que, para manobra espiral direta, ar calmo e águas tranquilas são requeridos.

Para teste espiral reverso, manobra zig-zag, teste pull-out e teste de bow thruster, recomenda-se que o vento não exceda 2, na escala Beaufort.

Finalmente, para qualquer outro teste, recomenda-se que o vento não exceda 4, na escala Beaufort.

Recomenda-se que a velocidade de vento máxima deve ser escolhida considerando-se características como velocidade do navio e deslocamento.

Faz-se referência ao padrão IMO A.751, que sugere que as provas não devem ser conduzidas quando a real velocidade do vento for maior que 5, na escala Beaufort, porém, destaca que alguns navios podem requerer velocidades de vento menores que 2, apesar de não esclarecer quais os tipos de navios.

4.3 Condições do navio para a prova

4.3.1 Condição de carregamento

Segundo a ITTC e a IMO A.751 recomenda-se que as provas sejam realizadas com o navio em seu carregamento máximo e trim nulo, pois, nessas condições, as manobras são consideradas mais críticas.

Quando a realização da prova nestas condições não for possível, deve-se conduzir os testes no calado mais próximo ao calado máximo, e com o menor trim possível, ou conduzir em condição de lastro com imersão do propulsor suficiente e, também, com o mínimo de trim.

4.4 Procedimentos para análise dos resultados

Assim como nas provas de velocidade, os dados obtidos nas provas de manobra são válidos, somente, para casos em que haja profundidade suficiente, condições ambientais amenas, um trecho que aproximação a velocidade constante e calado paralelo, além disso, recomenda-se carregamento máximo.

Correções são apontadas pela ITTC para serem feitas com base em testes com modelo ou em técnicas de simulação computacional.

Porém, a ITTC também explicita critérios a serem utilizados para a análise dos resultados de alguns testes de manobra.

Considerações finais

Acima foram apresentadas com características qualitativas e quantitativas todas as etapas passadas em uma prova de mar. Há de ressaltar que os métodos de correção BSRA, ISO 15016 e ITTC 2012 têm limitações se aplicados isoladamente.

O que ocorre na prática é que as Sociedades Classificadoras utilizam um híbrido das técnicas para que todos os resultados importantes sejam fiéis ao que se deseja obter.

Os resultados das provas de mar serão importantes pelos seguintes motivos: a prova de velocidade influenciará na velocidade média acordada em um contrato tipo “Voyage Charter Party”. E a prova de manobra será importante na segurança da navegação, desviar de obstáculos e outras embarcações, fazer um trajeto seguro em águas restritas, saber os limites em certa região para a navegação segura da embarcação.

Os navegantes deverão ter conhecimento das características de manobra da embarcação em que estão, para que todos os seus benefícios sejam alcançados delas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BSRA standard method of Speed Trial Analysis**, BSRA Report NS 466, 1978
- CHAIRMAN, JAMES E. CORLISS – **Guide for Sea Trials** – The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1990
- Code of Procedure for Measured-Mile Trials**, BSRA Report NS 56, 1964
- FONSECA, MAURÍLIO M. - **Arte Naval**. Rio de Janeiro – SDM, 7ª Edição, 2005
- HAAKENSTAD, KATHARINA - **Analysis and correction of sea trials** – Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology, 2012
- Interim Standards for Ship Manoeuvring, **Resolution A.751**, 1993
- ITTC Performance Committee. ITTC Guide for measured-mile trials, **Report of the ITTC Performance Committee**, Appendix I, 12th ITTC, 1969
- ITTC Recommended Procedures and Guidelines - Full Scale Measurements Manoeuvrability - **Full Scale Manoeuvring Trials**, 2012
- ITTC Recommended Procedures and Guidelines - **Speed and Power Trials**, 2012
- LEWIS, EDWARD V. - **Principles of Naval Architecture Volume II: Resistance, Propulsion and Vibration** – Hardcover, second revision, 1988
- LEWIS, EDWARD V. - **Principles of Naval Architecture Volume III: Motions in Waves and Controllability** – Hardcover, second revision, 1990
- MacELREVEY, DANIEL H. & MacELVERY, DANIEL E. - **Shiphandling for the Mariner**. - Cornell Maritime Press (4ª Edição: 2004)
- MIGUENS, ALTINEU PIRES - **Navegação: A Ciência E A Arte** – 3 Volumes
- Recommendation on the Provision and the Display of Manoeuvring Information on Board Ships, **Resolution A.601**, Annex, 1987
- ROTTEVEEL, ERIK - **Investigation of inland ship resistance, propulsion and manoeuvring using literature study and potential flow calculations** – Delft University of Technology, MSc Marine Technology Science Track, Ship Hydromechanics
- SILVA, JOÃO EMÍLIO C. - **Navios Novos E Provas De Mar** – Escola Superior Náutica Infante D. Henrique, Departamento De Engenharia Marítima